

O Projecto, a Construção e a Exploração de Pequenas Barragens de Aterro

João Marcelino
LNEC - DG/NBOA

Tópicos

- > Acidentes em barragens
- > Tipos de barragens de aterro
- > Dimensionamento-Aspectos essenciais
 - Folga
 - Inclinação taludes
 - Filtros & drenos
 - Protecção paramentos
- > Observação
 - Deslocamentos
 - Caudais
 - Inspeção



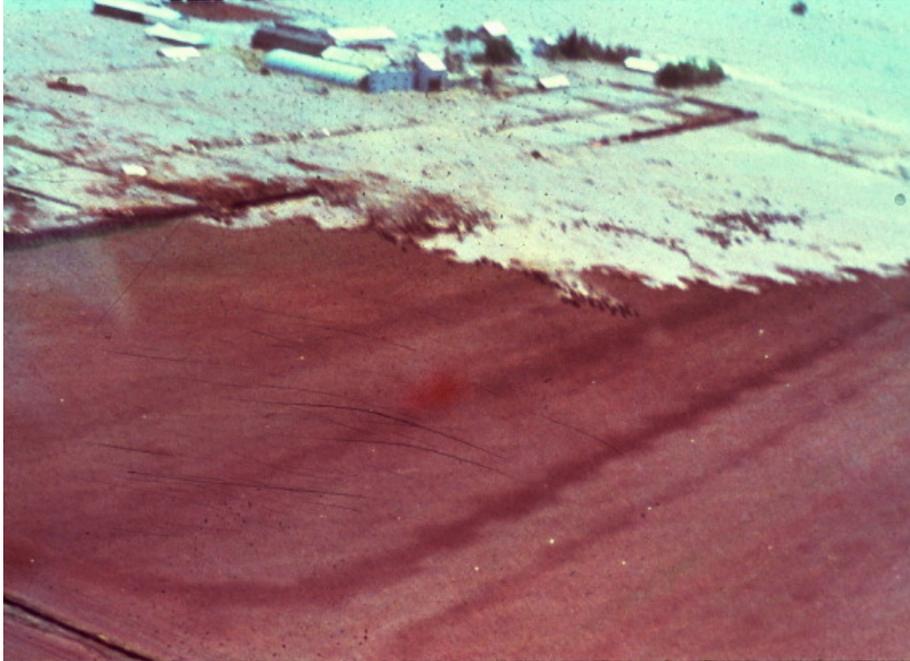
ZNEK

o mais famoso -Teton (Idaho-USA) 5-Jun-1976

93 metros de altura
356 milhões de m³
14 vidas perdidas...



Teton



Teton

- Transferência de tensões
- Filtros
- Estudos geológico-geotécnicos
- Lições muito importantes



Malpasset – rotura da fundação - França

- > onda com 40 m a 70 km/h
- > 2 aldeias destruídas
- > 2/12/1959



Vajont - Itália

- > Deslizamento na albufeira
- > onda com 245! m acima da barragem
- > 2500 vidas





Problemas no dimensionamento do descarregador



B. da Misericórdia - Portugal



B. da Misericórdia - Portugal



B. da Misericórdia - Portugal



Possível causa?





Galgamento?
Erosão interna?

Galgamento

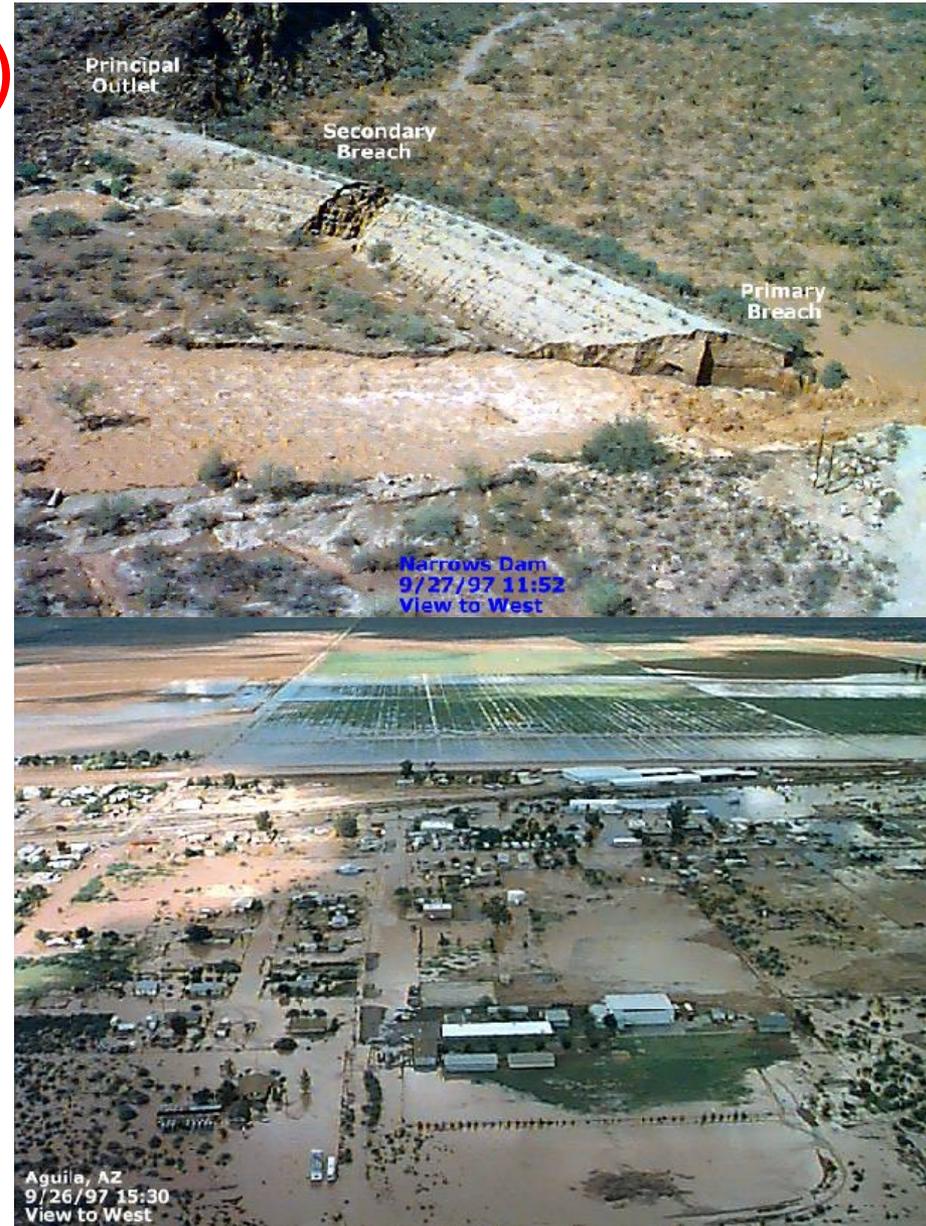


Em barragens de aterro o
galgamento é crítico!

Narrows dam (Arizona)



- 2 brechas
- 30 m de largura
- provavelmente causadas por piping



Algodões (Brasil Maio 2009)



Los Frailes (Espanha, 1998)

- > Na última década 1 rotura por ano
- > 25/4/98
- > exploração de zinco e chumbo
- > 6.8×10^6 m³ de lamas e águas ácidas
- > ataque ácido da fundação? (de natureza calcária)



Barragem do Lapão

Aspecto da barragem
antes do primeiro
enchimento



Fragusta (2011)





Estudo dos acidentes

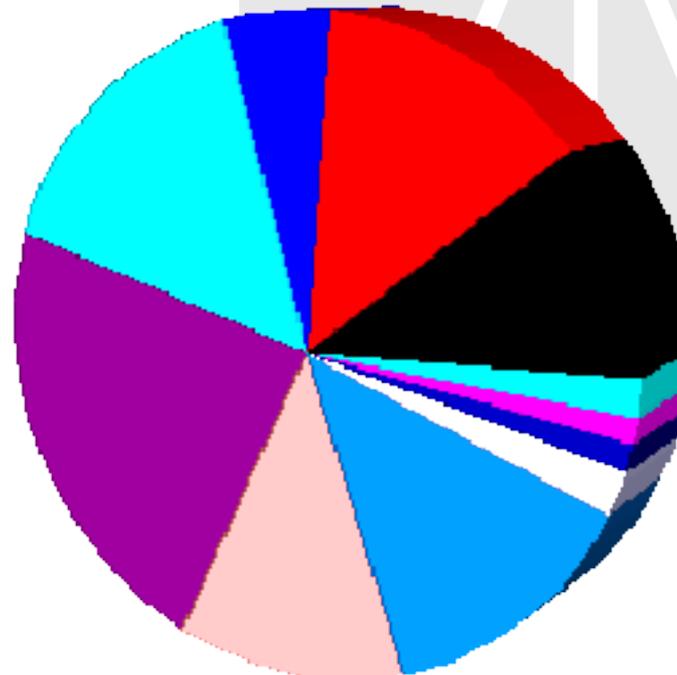
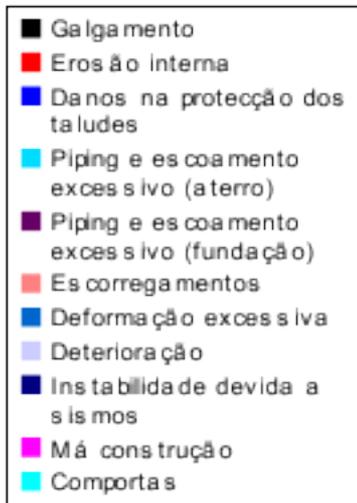
- > O estudo dos acidentes permite o conhecimento melhorado sobre:
 - comportamento dos materiais
 - opções de projecto
 - aspectos construtivos / opções
 - erros de operação ou problemas de manutenção
- > É uma importante fonte de conhecimento

Acidentes com barragens (aterro)

- > *Pipping* e percolação pela barragem e/ou fundação
- > Galgamento
- > Rotura da fundação
- > etc.

- barragens de terra- 74% do total
- este cenário já mudou
- roturas na fundação ocorrem cedo
- 50% das roturas entre 15 e 20 m

Acidentes e incidentes



Galgamento	11%
Erosão interna	13%
Piping aterro	16%
Piping fundação	23%
Deformação	76%

Tipos de barragens
Tratamento fundação
Projecto
Construção
Observação

Objectivos do represamento

- abastecimento das populações
- rega
- produção de energia eléctrica
- controlo de cheias
- armazenamento de rejeitados
- aquicultura
- usos recreativos e outros

Em geral não é condicionante das
soluções adoptadas

Barragens de aterro x betão

> Em aterro

- Estruturas mais económicas
- Menos exigentes em termos de fundação
- Melhor integração na paisagem
- Utilização de materiais locais
o sustentabilidade!

> Betão

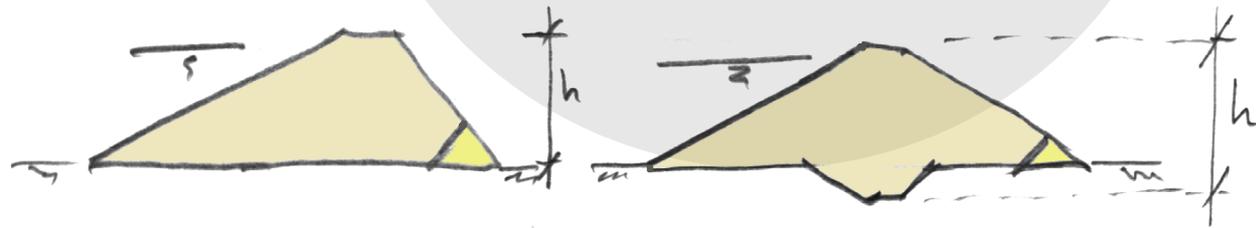
- Adequadas para vales apertados (e largos mas €...)
- Com boas condições de fundação
- Pouca susceptibilidade ao galgamento

> Mistas

> BCC

Pequenas barragens

- > Conceito dependente, por exemplo, do país
- > Em Portugal no Regulamento de Pequenas Barragens
 - Altura < 15 m
 - Volume da albufeira até 100 000 m³
 - se < 8m – o regulamento não é obrigatório
- > o RPB refere-se a:
 - projecto
 - construção
 - exploração
 - observação



As pequenas barragens são + perigosas!

> como?

- O risco potencial é, em geral, mais reduzido

> MAS

- o projecto é menos cuidado
- não há tanto dinheiro para prospecção, ensaios e estudos
- nem sempre se cumprem as regras básicas
- nem sempre há observação

> Muitos dos acidentes com pequenas barragens nem sequer estão relatados

Cuidados a ter

- > De acordo com as estatísticas dos acidentes 40% dos problemas estão relacionados com *piping* pela fundação ou pelo aterro
 - importância dos filtros!



ZNEK

Aspectos a considerar na concepção

> Localização da barragem

- Aspectos a considerar
 - o colocar na zona mais estreita do vale*
 - o condições de fundação*
 - o impermeabilização da albufeira*
 - o estabilidade de taludes da albufeira*
 - o disponibilidade de materiais*
- localização do descarregador de cheias
 - o capacidade de vazão*
 - o condições de fundação*
 - o tipo de descarregador*
 - o outros*

A large, light gray watermark of the ZNEC logo is centered on the right side of the slide. It consists of the letters 'ZNEC' in a bold, sans-serif font, with a stylized arrow pointing to the right integrated into the letter 'C'.

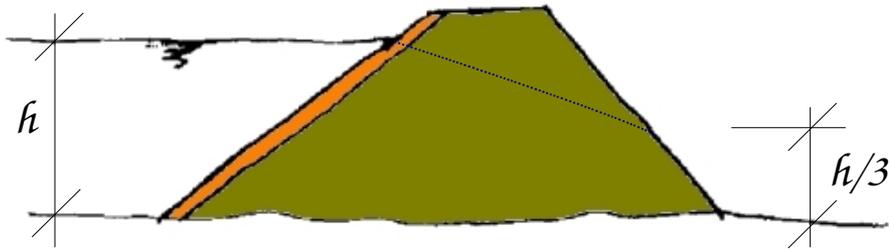
Barragens de aterro-Classificação

- > Tipos de barragens - quanto ao perfil tipo
 - Homogéneas
 - Zonadas
- > Tipos de barragens - quanto aos materiais
 - Solos
 - Enrocamento
 - Mistura solo-enrocamento
 - BCC (algures entre as barragens de betão e de terra)

Escolha do tipo de barragem

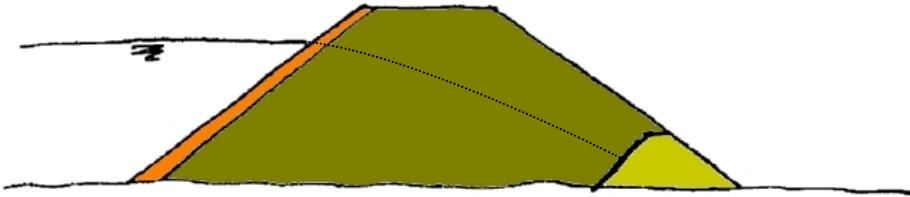
- > O projecto da barragem é feito tendo em consideração a disponibilidade de materiais locais
- > Em princípio (a menos de materiais com características muito deficientes) o projecto deve considerar a utilização dos materiais locais
- > Os filtros e drenos são excepção
 - podem vir de longe
 - podem ser fabricados

Barragens homogéneas



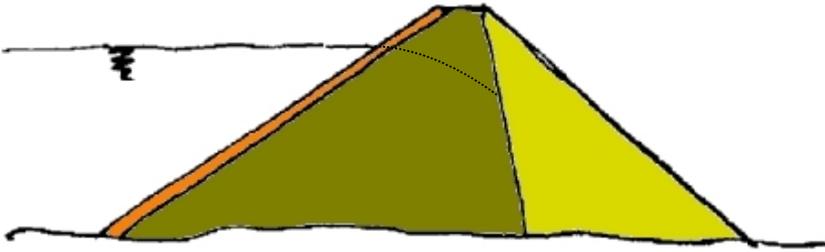
- > Usualmente construídas em materiais finos
- > Não possuem controlo de erosão e percolação
- > Limitadas a alturas reduzidas (≈ 5 m)

Com pé de talude



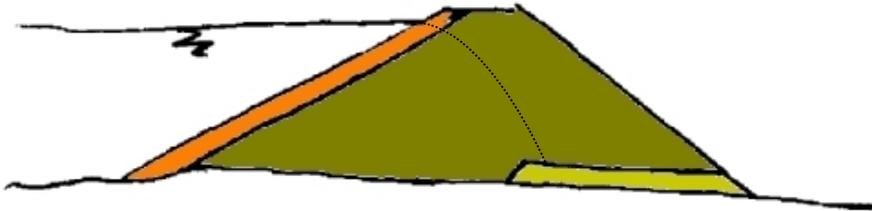
- > Usualmente construídas em materiais finos
- > Limitadas a alturas reduzidas (≈ 10 m)
- > Funcionamento do pé de talude em função da isotropia do material de aterro

Aterro zonado



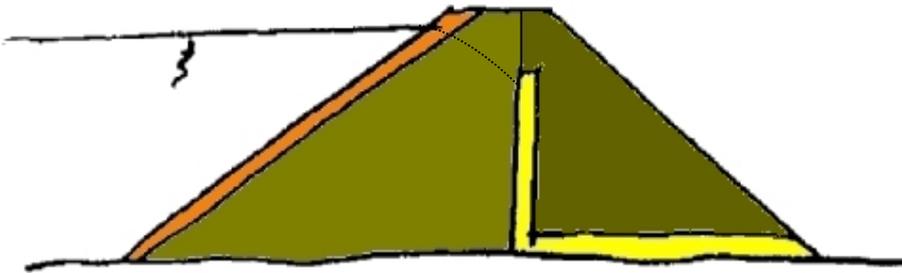
- > Materiais ou condições de compactação \neq
- > Controlo de percolação feito pelo material de jusante
- > Solução limitada a barragens com cerca de 20 m

Aterro com tapete drenante



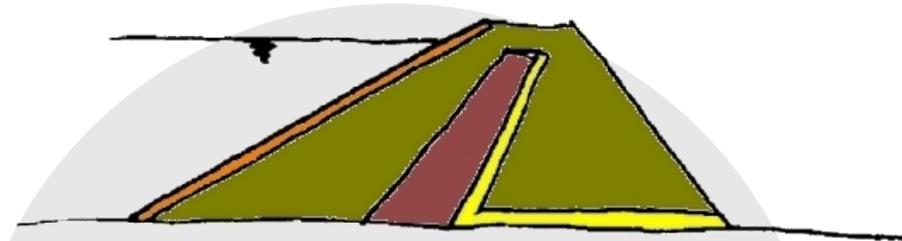
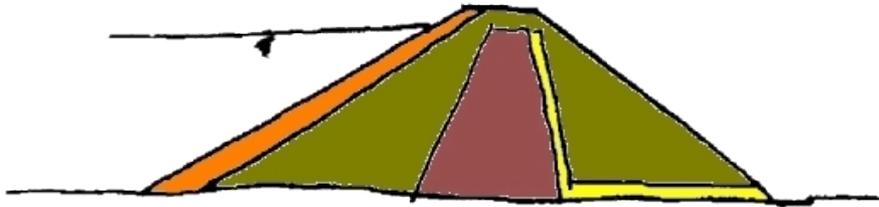
- > Semelhante à barragem homogénea
- > Tapete drenante/filtro para controlo de percolação e erosão
- > Funcionamento dependente da isotropia de permeabilidade do material de aterro
- > Deve ser limitada a alturas inferiores a 10 m

Barragem com filtro e dreno



- > Homogénea ou zonada
- > Controlo efectivo do escoamento e erosão através do filtro chaminé
- > Não tem limitações em termos de altura

Barragem zonada com núcleo



- > Optimização de materiais
- > Controlo efectivo da percolação e erosão através do filtro e dreno
- > Materiais mais finos e impermeáveis no núcleo
- > Materiais mais grosseiros e resistentes nos maciços

distribuição de custos numa barragem de aterro em solos(30 m)

> % do custo total

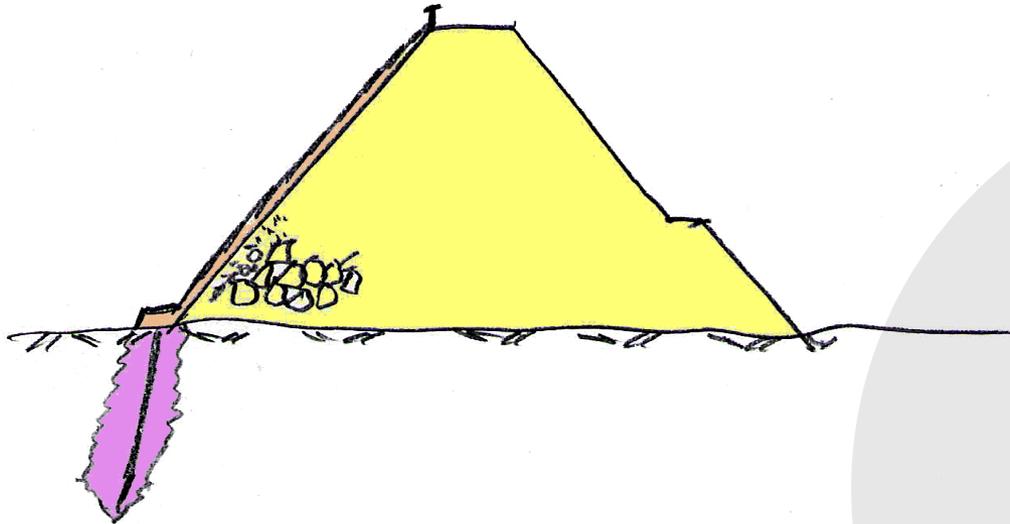
- aterros – 20 a 25%
- materiais nobres (filtros e drenos) 10 a 20%
o em volume < 10% (5 a 7) que o volume da barragem
- injecções 5 a 15%
- órgãos hidráulicos (dc + df + torre) 20 a 40%
- instrumentação – 2 a 4 %

> m³ de aterro (custo total) – 12 a 15 €

> m³ de aterro (solos) – 2,5 a 4 €

> m³ de filtro ou dreno – 15 a 20 €

Barragem com cortina



- > Adequadas quando há falta de solos finos
- > normalmente feita de enrocamento
- > pode ser zonada
- > + onerosa
- > a cortina é um elemento crítico

distribuição de custos numa barragem aterro de enrocamento (30 m)

> % do custo total

- aterros – 20 a 25%
- injecções + plinto + cortina – 20 a 25%
- órgãos hidráulicos (dc + df + torre) 18 a 22%
- instrumentação – 1 a 3 %

> m³ de aterro (custo total) – 22 a 25 €

> m³ de aterro (enrocamento) – 4 a 6 €

Tratamento da fundação

- > As barragens de aterro são menos exigentes em termos de fundação mas...
- > quando é necessário tratamento:
 - pode ser:
 - o no que respeita ao escoamento*
 - o no que respeita ao comportamento mecânico*
 - resistência
 - deformabilidade

No que respeita ao escoamento

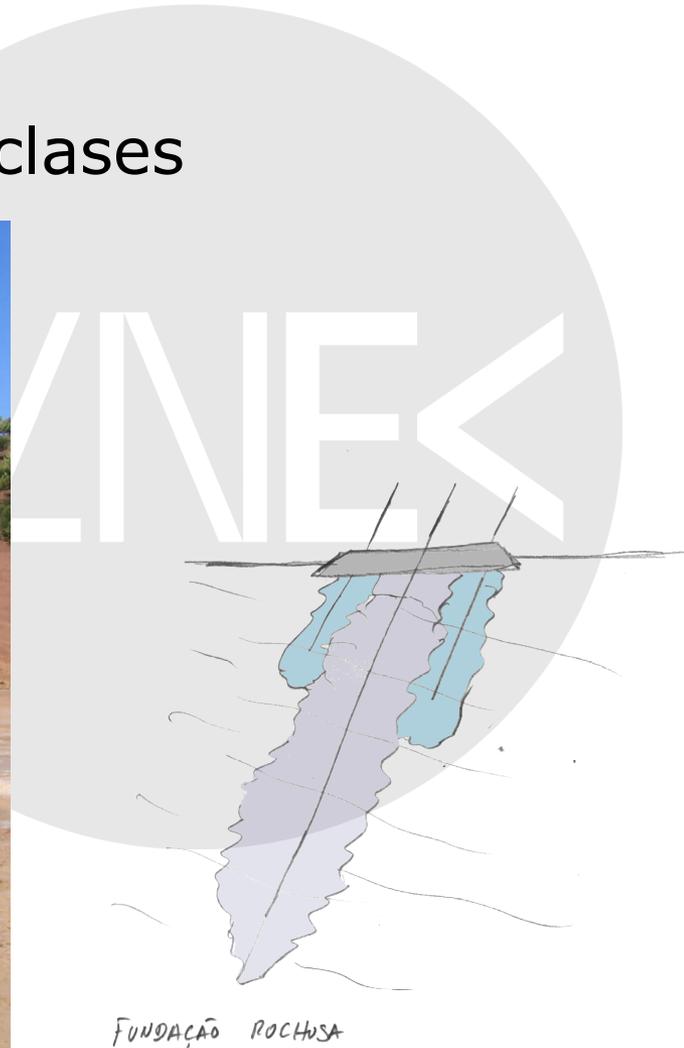
- > É necessário garantir que a fundação da barragem é “impermeável”
- > soluções correntes
 - cortinas
 - valas corta-águas
 - tapetes impermeabilizantes
- > escolha dependente de múltiplos aspectos: alguns exemplos →



ZNEC

Cortinas

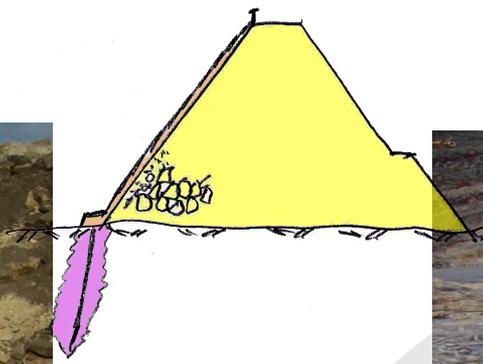
> injeccões, fundação rochosa, diaclases

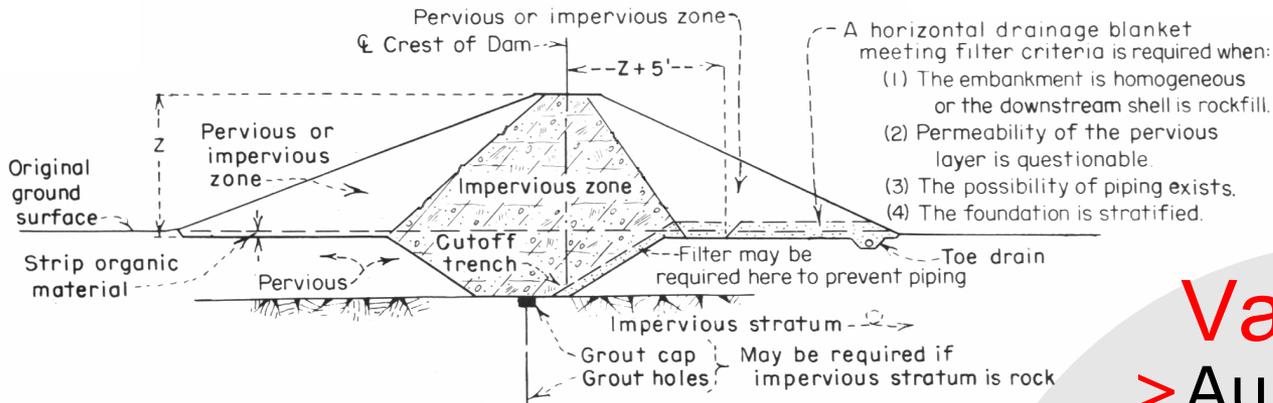




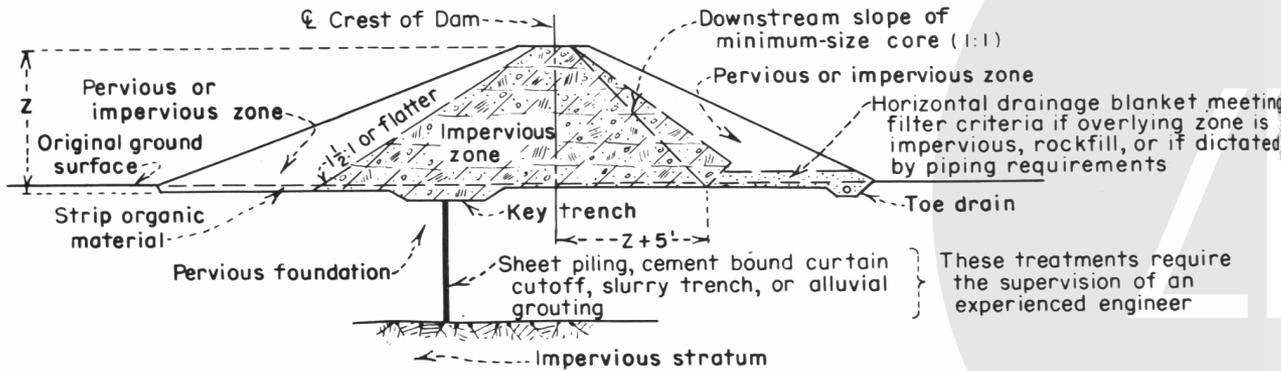
2008/04/17

Cortinas - plinto

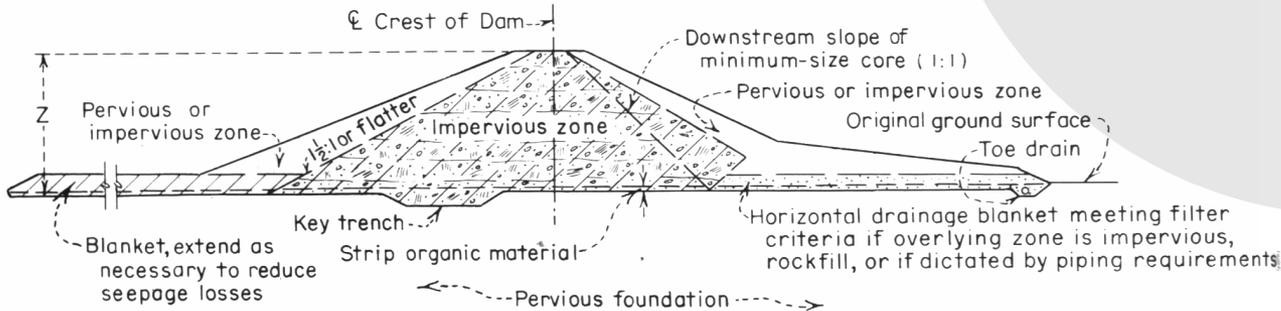




(A) SHALLOW PERVIOUS FOUNDATION



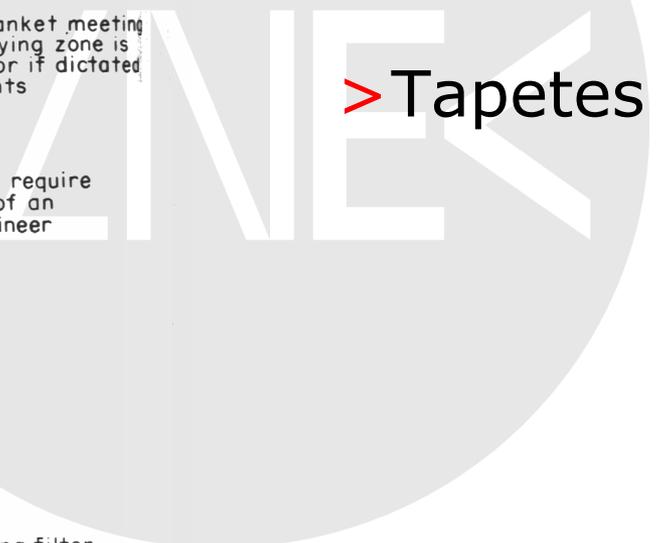
(B) INTERMEDIATE DEPTH OF PERVIOUS FOUNDATION



(C) DEEP PERVIOUS FOUNDATION

Vala corta-águas
 > Aumentar caminho de percolação

> Tapetes



Vala Corta-águas



LN**EC**

Projecto e dimensionamento

Permeabilidade dos solos

		permeabilidade em m/s												
		10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	
Características de drenagem		Boas					Deficientes			Más				
Classificação de permeabilidade		Alta		Média		Baixa		Muito baixa		Praticamente impermeável				
Tipo de solo	Gravilha, blocos	Areias limpas			Areias finas ou siltosas			Argilas fissuradas ou alteradas					Argilas	
Ensaio indirecto		Calculado com base na granulometria								Ensaio edométrico				
Ensaio directo	Carga constante	Carga constante			Carga variável				Carga variável (edómetro)					

Variação de 10¹¹!

Classificação unificada

GW	cascalho* bem graduado
GP	cascalho mal graduado
GM	cascalho siltoso
GC	cascalho argiloso
SW	areia bem graduada
SP	areia mal graduada
SM	areia siltosa
SC	areia argilosa
CL	argila magra
ML	silte
OL	silte orgânico ou argila orgânica
CH	argila gorda
MH	silte elástico
OH	silte orgânico ou argila orgânica
PT	turfa

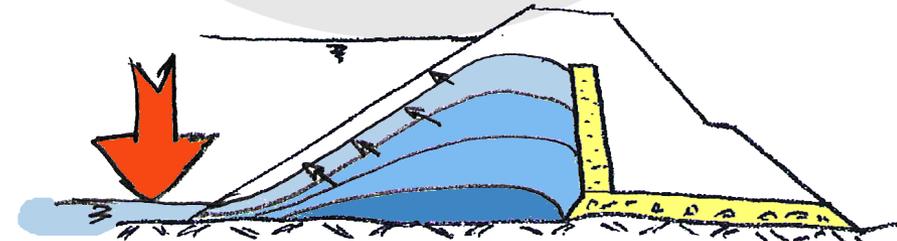
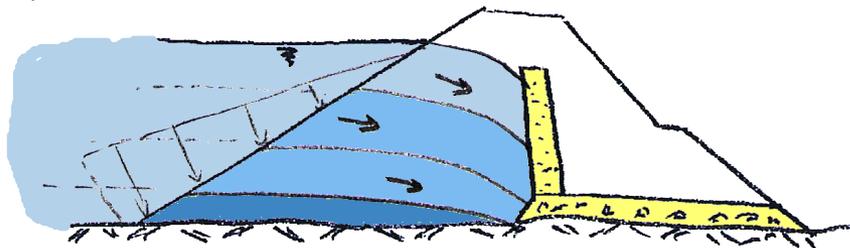
- > Criada durante a 2^a Guerra
- > Adoptada pelo Corp of Engineers e pelo Bureau of Reclamation

Inclinação de taludes- Barragem homogénea

> Com base na classificação dos materiais

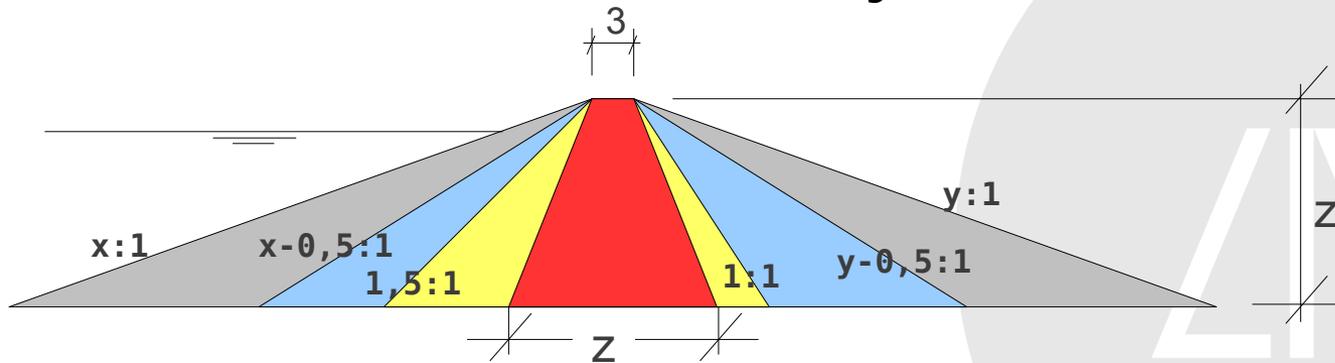
Classificação	Talude de Montante		Talude de Jusante (H/V)
	(H/V)		
		esv. rápido	
GW, GP, SW, SP	Permeável, não adequado		
GC, GM, SC, SM	2,5/1	3,0/1	2.0/1
CL, ML	3,0/1	3,5/1	2,5/1
CH, MH	3,5/1	4,0/1	2,5/1

Design of Small Dams - US Bureau of Reclamation



Inclinação de taludes – Barragem Zonada

> Com base na classificação dos materiais



Tipo	Esvaziamento rápido	Material maciços	Material Núcleo	Montante	Jusante
Zonada núcleo mínimo	não crítico	Enrocamento, GW, GP, SW, SP	GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH, MH	2,0:1	2,0:1
Zonada núcleo máximo	não	Enrocamento, GW, GP, SW, SP	GC, GM	2,0:1	2,0:1
			SC, SM	2,25:1	2,25:1
			CL, ML	2,5:1	2,5:1
			CH, MH	3,0:1	3,0:1
Zonada núcleo máximo	sim	Enrocamento, GW, GP, SW, SP	GC, GM	2,5:1	2,0:1
			SC, SM	2,5:1	2,25:1
			CL, ML	3,0:1	2,5:1
			CH, MH	3,5:1	3,0:1

 Dimensão máxima para o núcleo impermeável

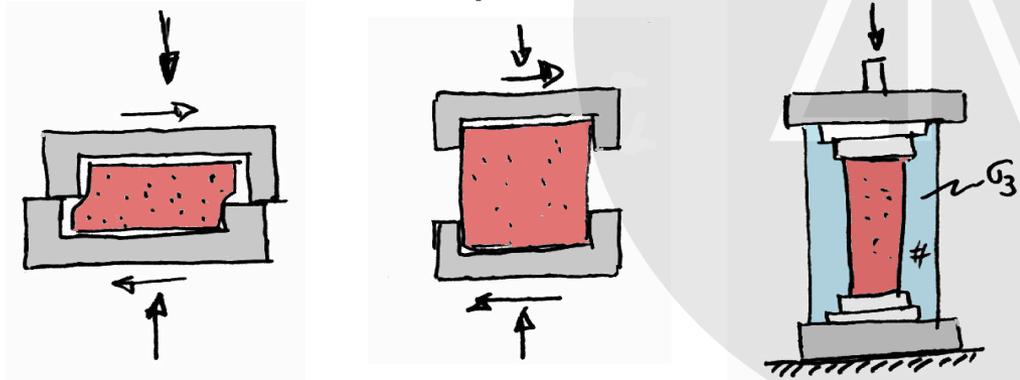
 Dimensão mínima para o núcleo impermeável fundação permeável sem vala corta águas

 Dimensão mínima para o núcleo impermeável com fundações permeáveis ou impermeáveis pouco profundas com vala corta águas

Inclinação de taludes - Geral

> Ensaios de caracterização mecânica

- Ensaio de corte directo
- Ensaio de corte simples
- Ensaio de corte em compressão triaxial



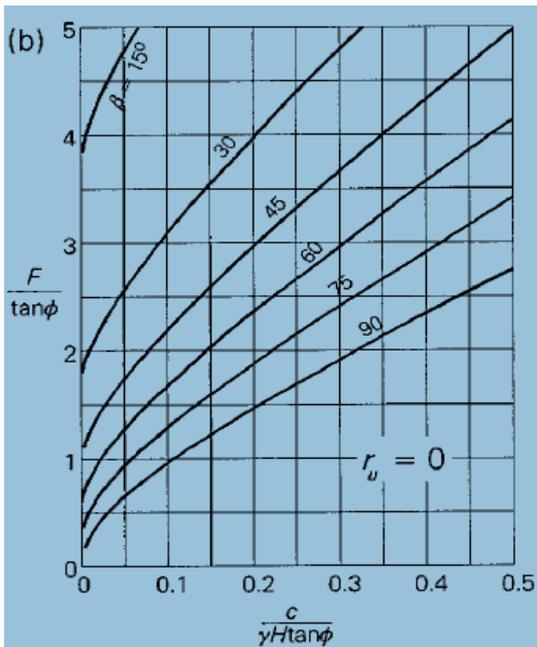
> Determinar parâmetros de resistência ao corte (Mohr-Coulomb) c' e ϕ'

primeira estimativa ! $\longrightarrow FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$

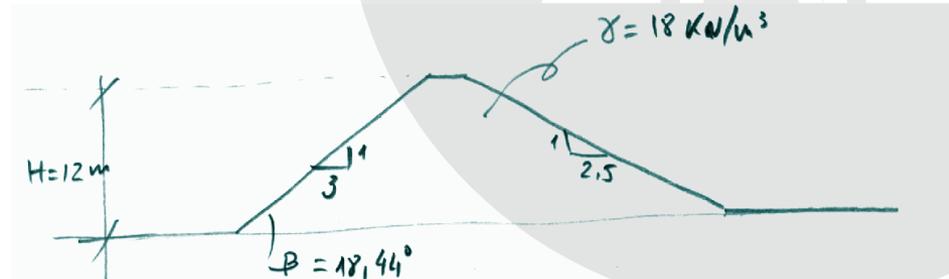
Inclinação de taludes - Geral

- > Cálculo de estabilidade por equilíbrios limite (método das fatias)
- > Utilização de ábacos
 - Por exemplo

>



Michalowski, R. L. (2002) - Stability Charts for Uniform Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 4, April 1, 2002.



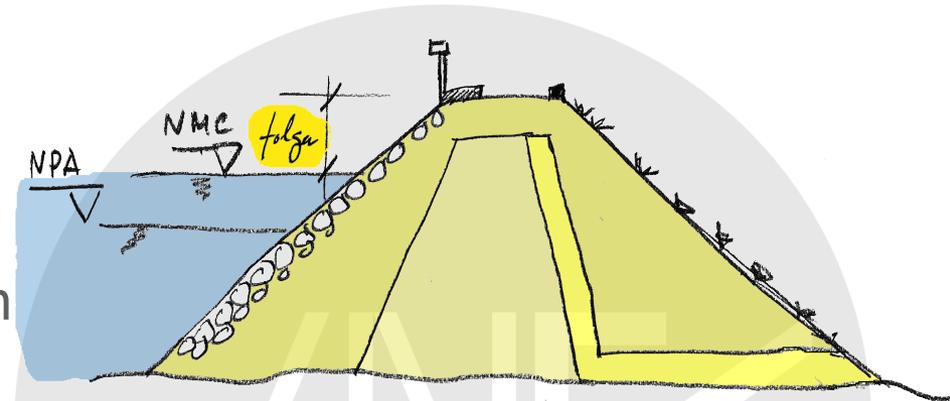
calcular: $\frac{c}{\gamma H \tan(\phi)}$

determinar $\frac{F}{\tan(\phi)}$ para a curva β correspondente

Folga

> RPB Art.11

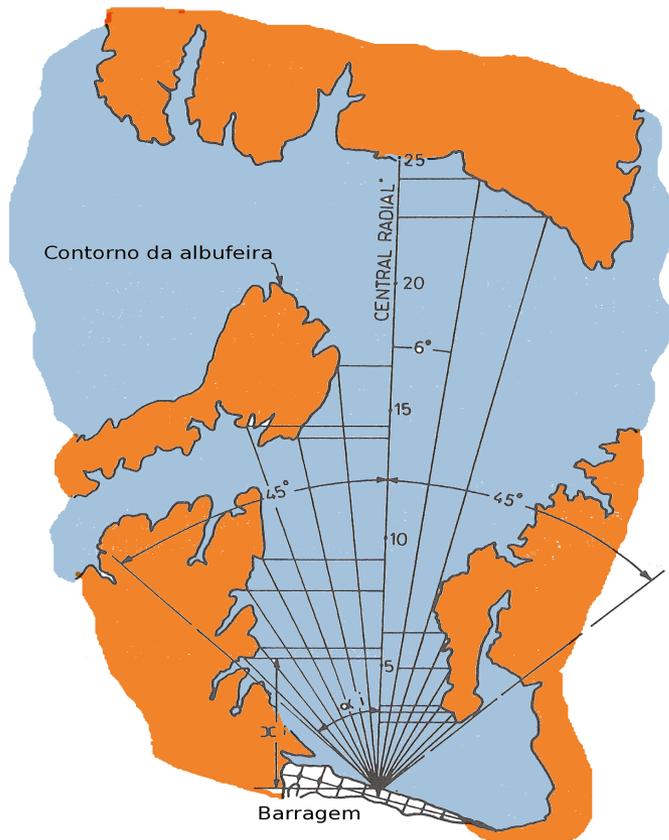
- sismicidade
- características da barragem
- ondas
- > 1 m



Fetch (km)	Folga (m)	
	Recomendado	Mínimo
<1,5	1,2	1,0
1,5	1,5	1,2
5,0	2,0	1,5
7,5	2,5	1,8
15,0	3,0	2,0

Fetch

> Dimensão da albufeira que está relacionada com a geração de ondas



$\pm 6, \pm 12, \pm 18, \pm 24, \pm 30, \pm 36$ e ± 42

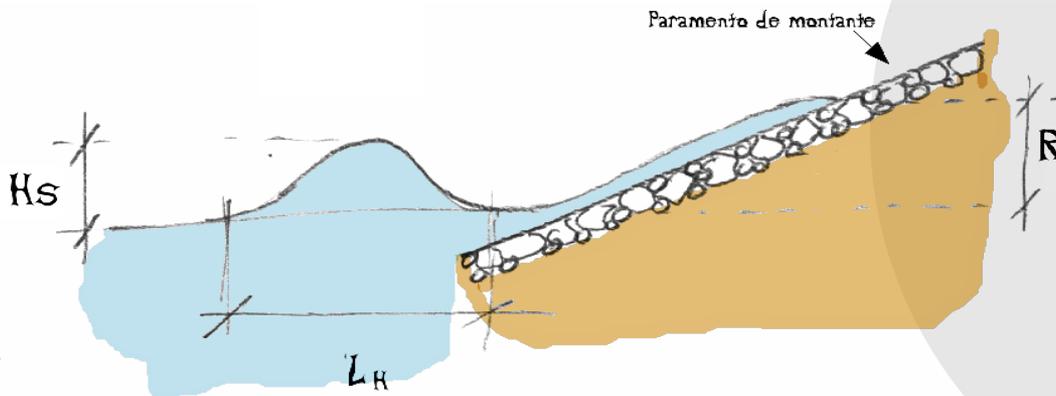
$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=15} x_i \times \cos(\alpha_i)}{\sum_i \cos(\alpha_i)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=15} x_i \times \cos(\alpha_i)}{12,512}$$

Cota do coroamento

- > o NPA é estabelecido tendo em atenção as necessidades de água
- > o NMC depende do NPA, dos órgãos de descarga, da bacia hidrográfica e da precipitação
- > a cota do coroamento é estabelecida por razões geotécnicas
 - a barragem não pode ser galgada

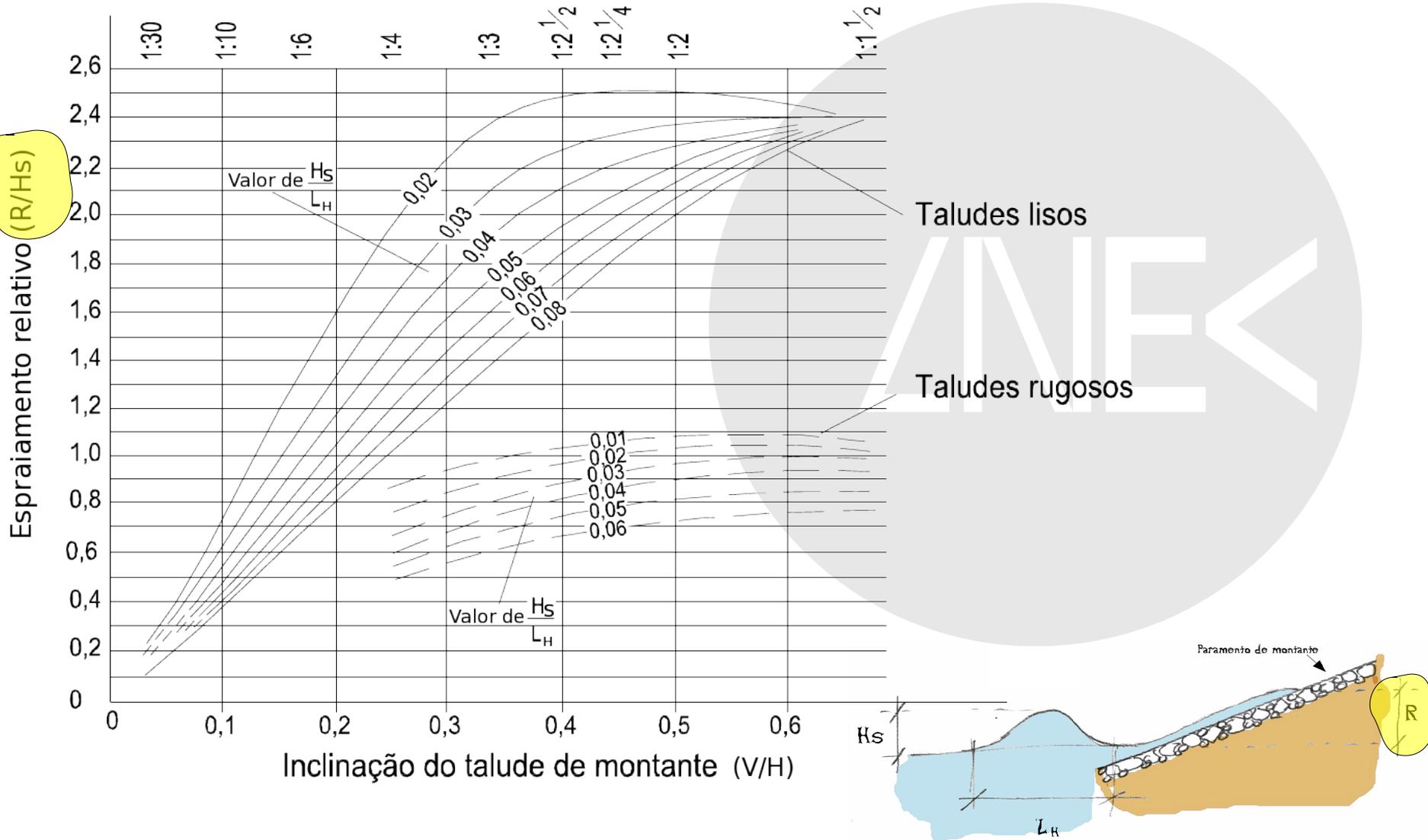
Cota do coroamento (CC)

- $CC > NPA +$ altura da onda devida ao vento excepcional
- $CC > NMC + 1.5 \times$ altura da onda devida ao vento habitual



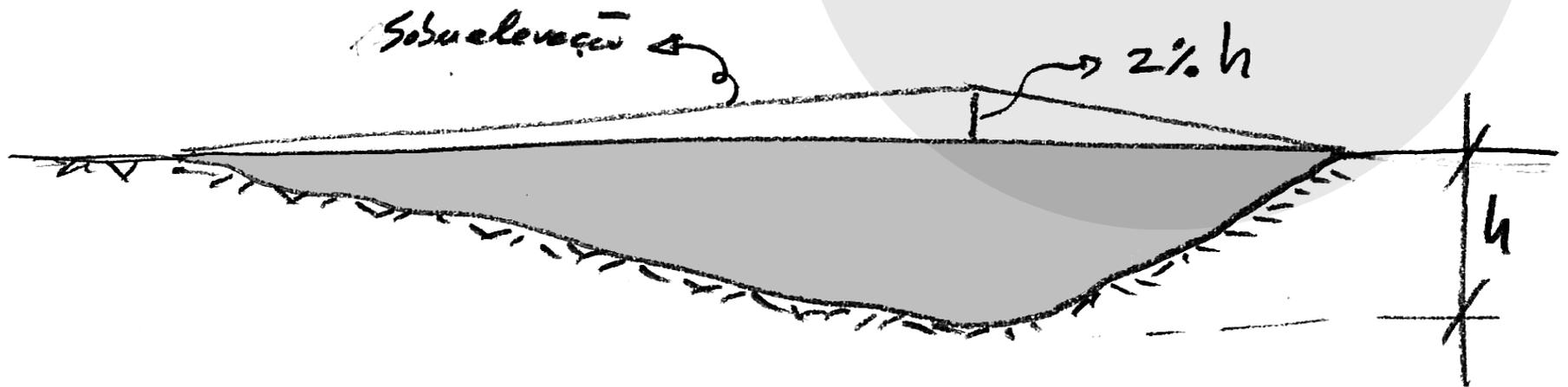
- Altura da onda- depende do vento, da forma da albufeira e do fetch
 - Vento
 - *EC1*
 - *medições*
 - *regulamentos*
 - *recomendações*

Onda - altura de espraiamento



Sobreelevação

> Solos- comportamento diferido



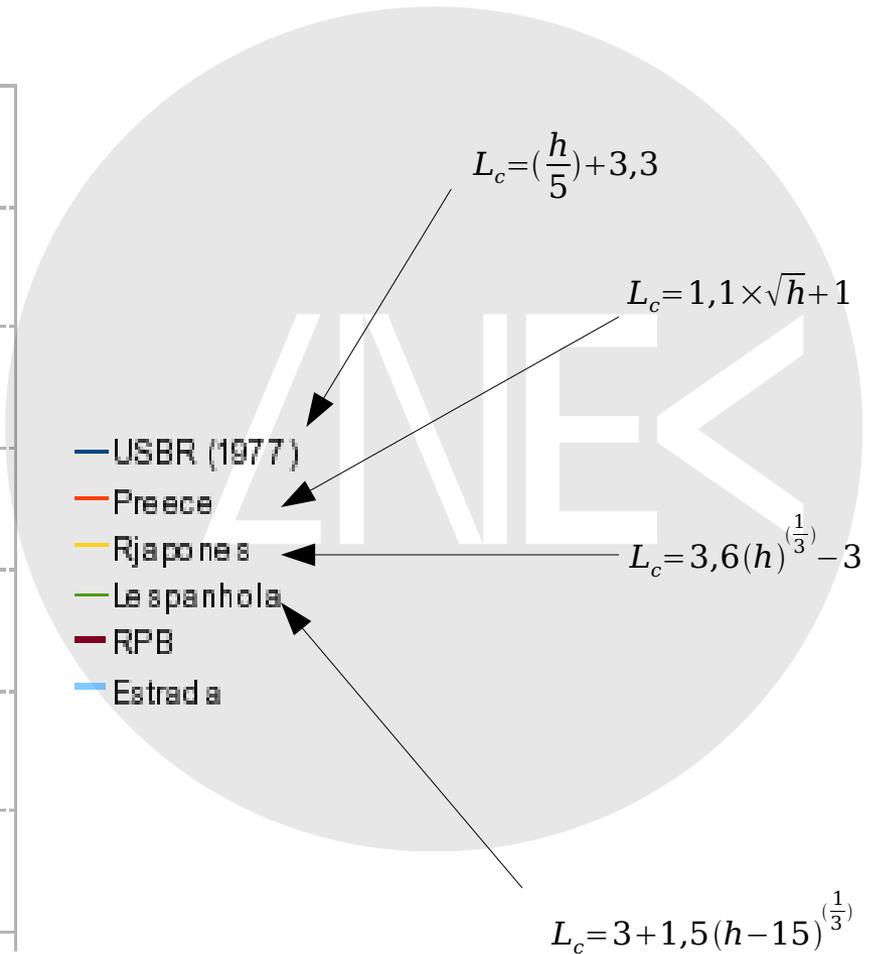
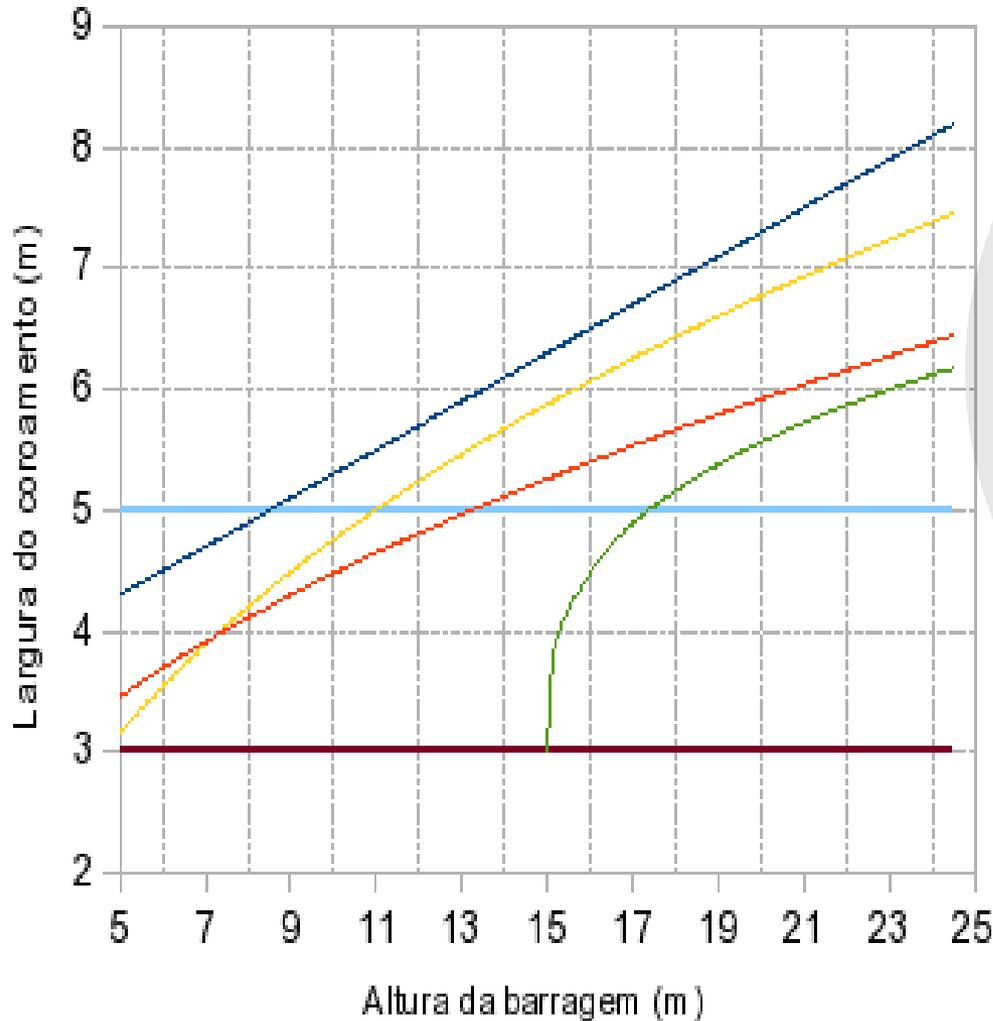
Largura do coroamento

> RPB Artigo 12.º - Largura do coroamento

- utilização (passagem esporádica de veículos ou estrada com tráfego),
- altura da barragem,
- aspectos construtivos,
- outros.
 - Bureau of Reclamation (1977)
 - outros...

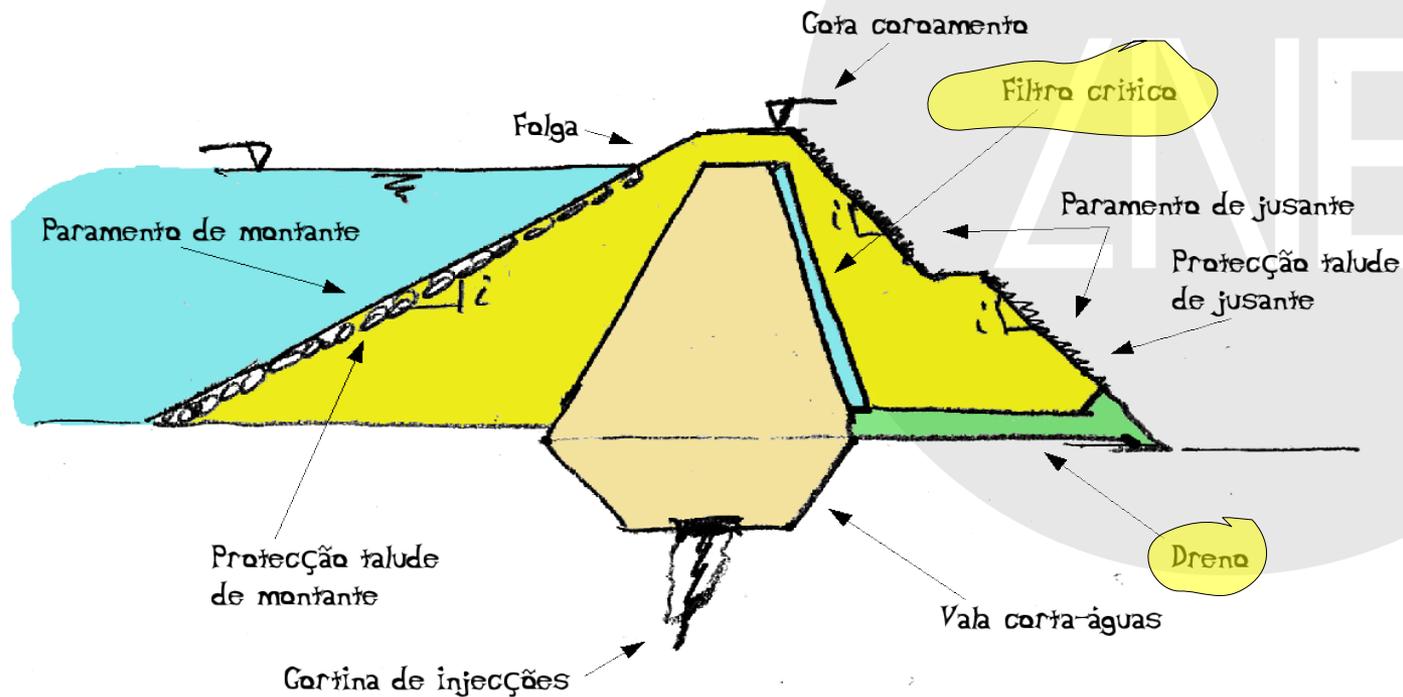
$$L_c = \left(\frac{h}{5}\right) + 3,3$$

Largura coroamento



Filtros e drenos

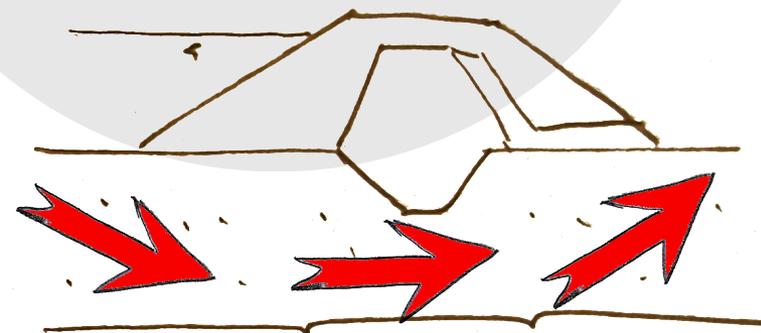
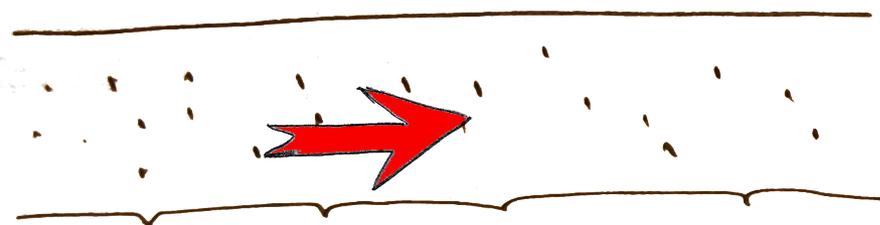
> órgãos extremamente importantes



Dimensionamento dos filtros e drenos

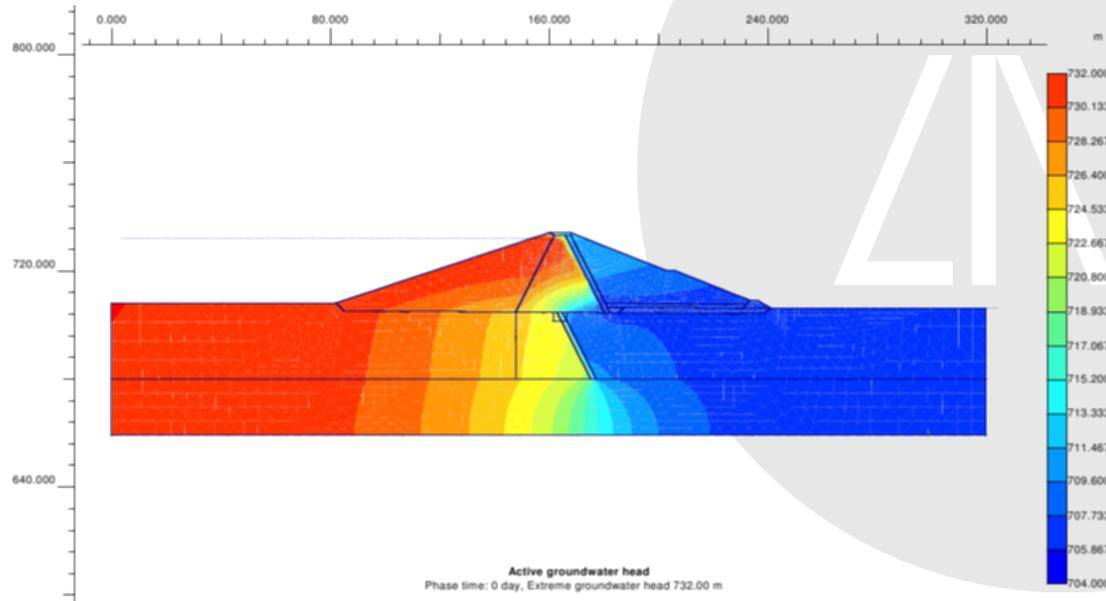
- > depende do caudal
- > depende da geometria
- > depende dos materiais

- > A construção de uma barragem causa uma grande alteração ao escoamento original



Cálculo do caudal e estudo das pressões

> Materiais e geometrias complexas ➡ utilização do método dos elementos finitos



> Casos mais simples ➡ métodos aproximados

- traçar a rede de fluxo

Rede de fluxo

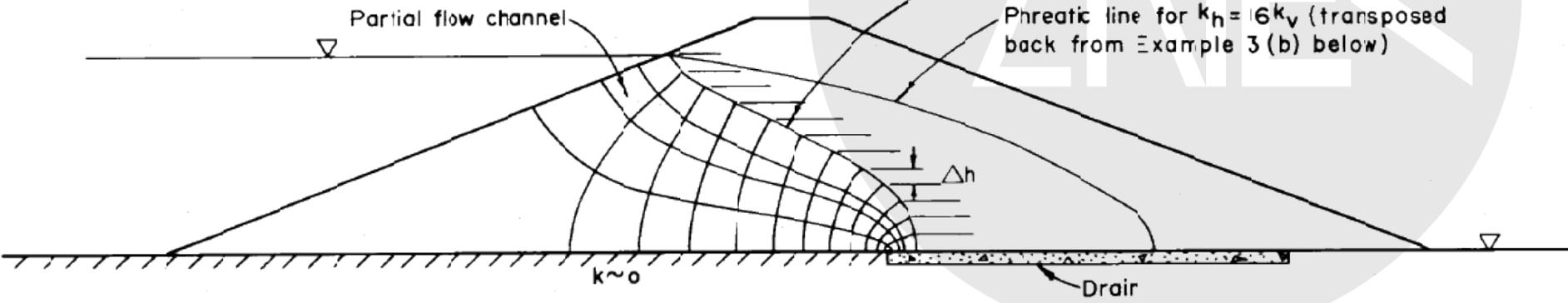
- o potencial é uma grandeza definida como sendo a soma de dois termos: o potencial de pressão e o potencial de posição.

$$H = \frac{p}{\gamma} + z$$

- a rede de fluxo é feita por construção gráfica num perfil transversal da barragem.
- a rede é composta por dois tipos de linhas: equipotenciais e linhas de corrente.
- num material isotrópico estas linhas são perpendiculares.

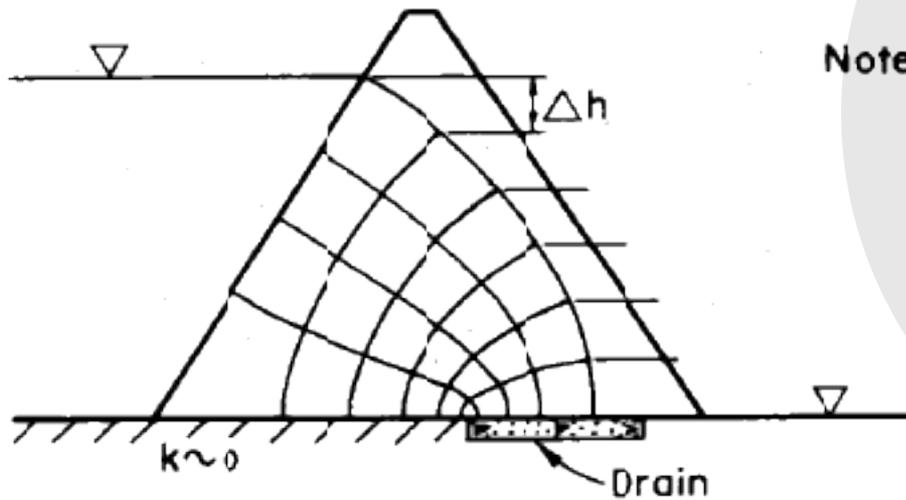
Caso isotrópico

Note: Flow net is for isotropic case ($k_h = k_v$)



(a) True section

Anisotropia



(b) Transformed section ($k_h = 16k_v$)

Note: Horizontal transformation factor =

$$\sqrt{\frac{k_v}{k_h}} = \sqrt{\frac{1}{16}} = 0.25$$

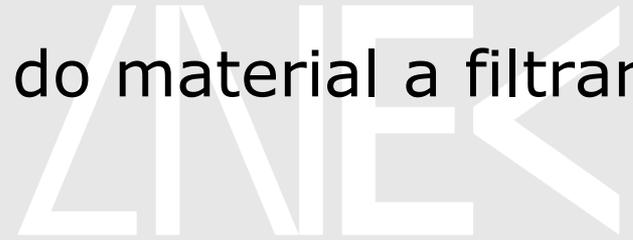


Dimensionamento dos filtros e drenos

> Regras de filtro

- materiais finos
- materiais não finos

> relações entre a granulometria do material a filtrar e o material de filtro



Solos sem coesão

> Terzaghi

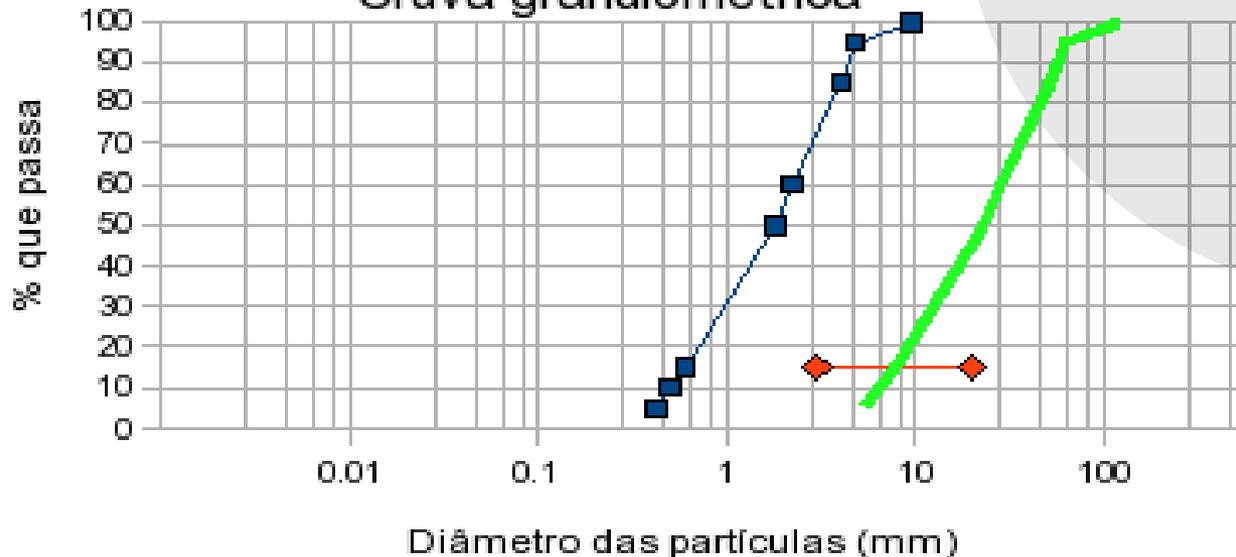
> Cedergren (1973)

$D_{15} \text{ (filtro)} \leq 5 d_{85} \text{ (base)}$	assegura a capacidade de retenção pelo filtro das partículas do solo a proteger
$D_{15} \text{ (filtro)} \geq 5 d_{15} \text{ (base)}$	assegura um adequado contraste de permeabilidades entre os materiais

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 20$$

Evitar segregação durante a construção

Cruva granulométrica



Solos com coesão

> divisão em 4 grupos

1) Argilas e siltes finos, com mais de 85% de material passado no Peneiro #200

$$D_{15} < 9d_{85} \text{ e } D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$$

2) Siltes e argilas arenosas, com 40 a 85% de material (da parte passada no Peneiro #4) passado no Peneiro #200

$$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$$

3) Areias silto-argilosas, com menos de 15% de material (da parte passada no Peneiro #4) passado no Peneiro #200

$$D_{15} \leq 4d_{85}$$

4) Solos impermeáveis, mais grosseiros, intermédios entre os do ponto 2 e 3, com 15% a 40% de material passado no peneiro N°200

$$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm e } D_{15} \leq 4d_{85}, \text{ por interpolação na percentagem no } \#200$$

Solos com coesão (cont.)

> Em qualquer dos casos

- limitação dos finos, #200 < 5%
o tem a ver com a capacidade de manter uma fenda aberta
- $D_{\max} < 2''$ (50 mm)
- % que passa no # 4 > 40%
- curva sensivelmente paralela à do material de base

Determinação da permeabilidade dos filtros

- > Através de ensaios (desejável)
- > Através de expressões empíricas (aceitável na fase de projecto)

$$> k[m/s] = \frac{150 \times n^3}{S^2 \times (1-n)^2}$$

n = porosidade

e

$$S = f \sum^n (W_n \times S'_n)$$

W_n percentagem em peso do material com dimensões entre x_1 e x_2

$f = 1,1$ (coeficiente de forma)

n de 0,25 a 0,35

$$S'_n = \frac{6}{\sqrt{x_1 \cdot x_2}}$$

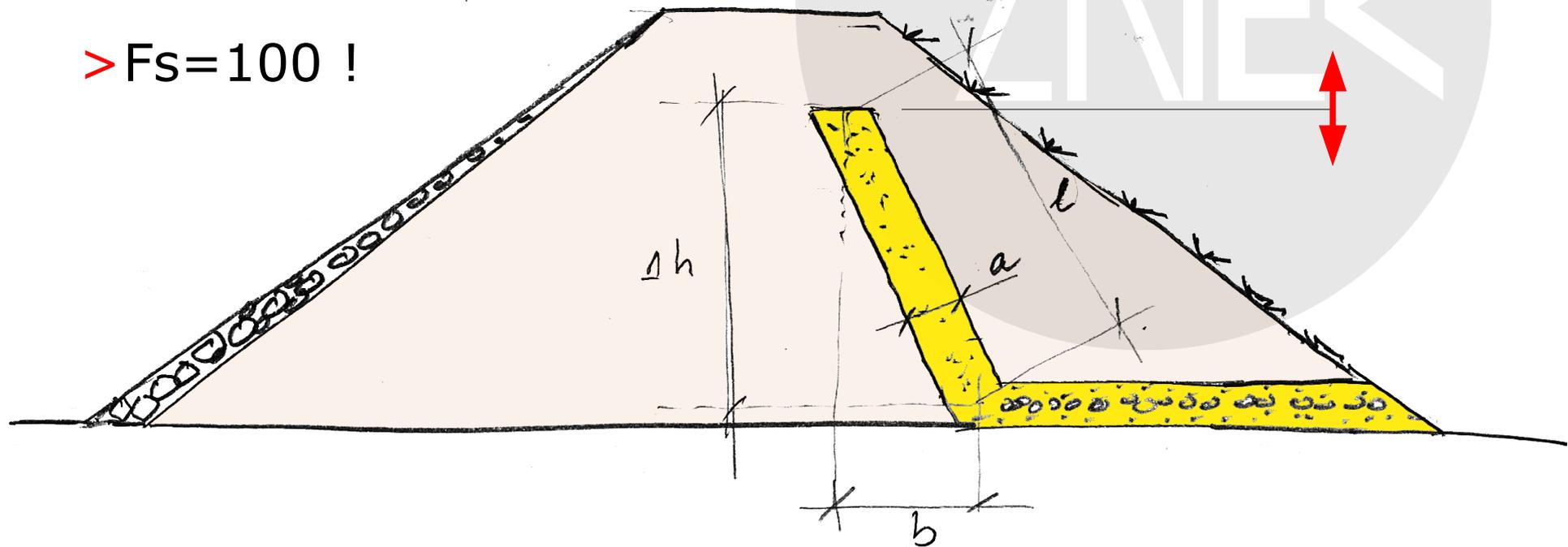
Dimensionamento do filtro

> Lei de Darcy

$$Q = k \times i \times a = k \times a \frac{\Delta h}{l}$$

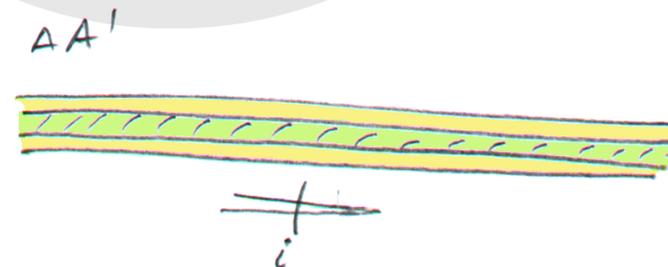
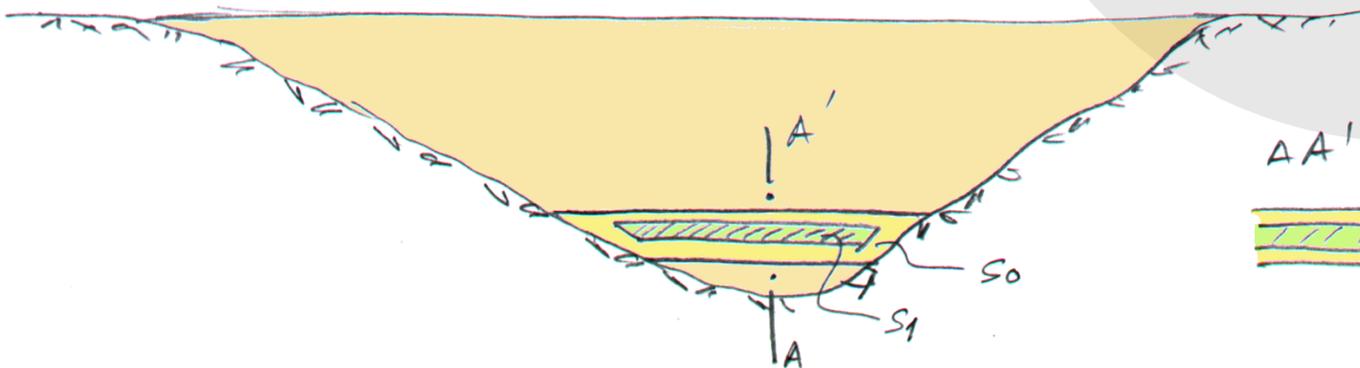
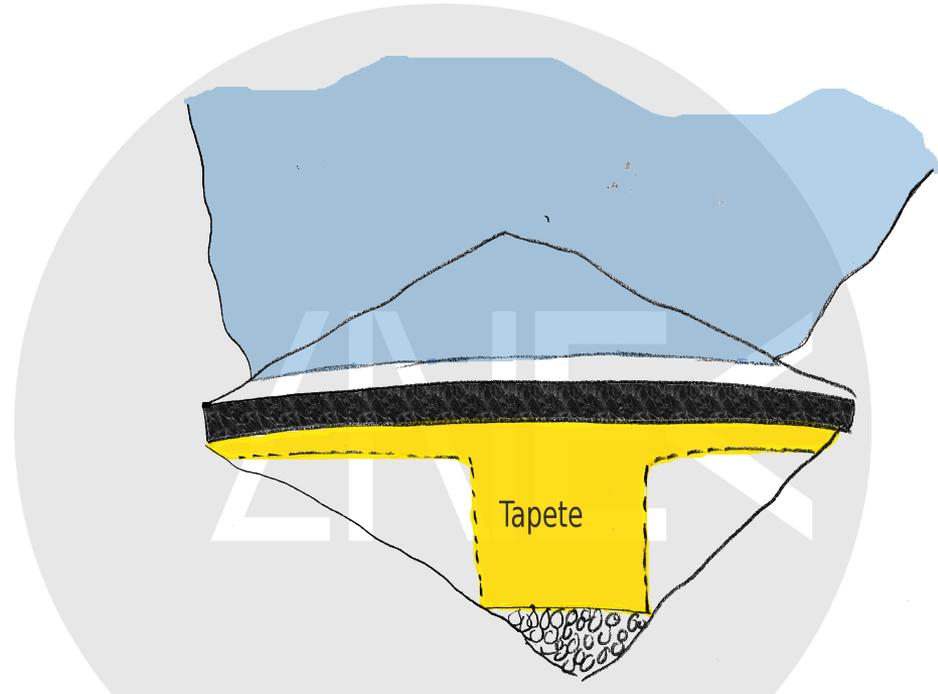
> otimização do dimensionamento

> $F_s = 100$!



Dimensionamento do tapete drenante

$$Q = \sum k_{xi} \times i \times S_i$$



Protecção do paramento de montante

> Soluções possíveis

- elementos pré-fabricados (betão)
- colchões reno
- **enrocamento**

o de acordo com a experiência é a solução técnica e economicamente mais adequada



Protecção do paramento de montante

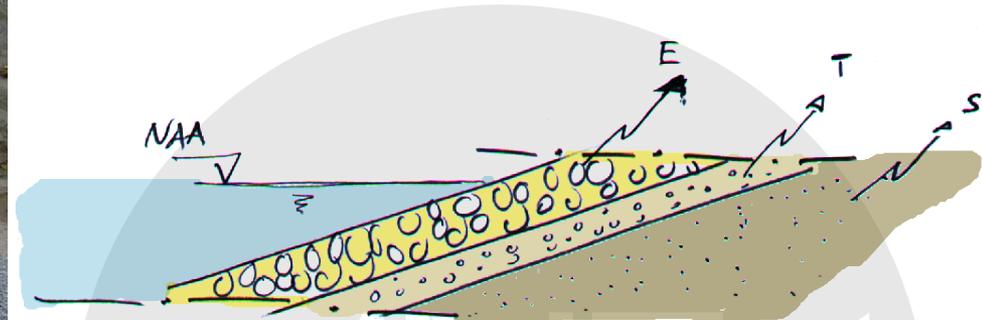
> Protecção em enrocamento

- cada bloco deve ser estável
- deve impedir o arraste do material subjacente

> Dimensionamento

- determinação das características dos ventos no local da obra; □
- determinação da altura e características das ondas; □
- definição das características do enrocamento de modo a resistir à acção das ondas.
 - o *O dimensionamento consiste em fixar o peso dos blocos*
 - o *A distribuição granulométrica*
 - o *A forma da camada*

Camada de transição



- > S é o solo do local
- > E é o enrocamento
- > T tem de filtrar S e ser filtrado por E
- > pode ser necessário T1, T2, ...
- > Geotexteis?

Espessura da camada?

> Sherard et al. (1963)

Altura da onda (m)	Espessura mínima da camada "T" (mm)
0-1,2	150
1,2-2,4	225
2,4-3,0	300

> pequenas barragens com albufeira "normal";
h=150 mm

Controlo de construção

João Marcelino
LNEC - DG/NBOA

Definição dos parâmetros de compactação

- > Idealmente a fazer na fase de projecto
- > Implicaria a realização de aterros experimentais com os equipamentos de obra
 - Aspectos a considerar
 - o *Nível de energia dos equipamentos de compactação*
 - o *Prazo construtivo*
 - Deformabilidade da fundação
 - Sismicidade
 - o *teor em água!*
 - Materiais incluídos no perfil (perfil tipo)

Controlo de construção

- > A Fiscalização representa o Dono de Obra
 - tem as valências técnicas para verificar a execução do projecto
 - pode analisar soluções de obra escolhendo a que considerar mais indicada
 - não pode subverter o projecto
- > Custo (total) de 5% do valor da empreitada
 - fiscalização de todas as especialidades
- > O empreiteiro pode e deve ter auto-controlo
 - o que não dispensa a fiscalização

Materiais

- > No projecto e na construção de uma barragem de aterro o controlo dos materiais é fundamental

- > Difere dos aterros em vias de comunicação pela importância acrescida do teor em água
 - rigidez
 - fragilidade ↔ plasticidade
 - permeabilidade

- > O controlo é, em geral, feito pelo método indirecto, i.e. não se ensaiam directamente as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade, assumidas no projecto mas sim parâmetros que, caso se verifiquem, garantem aquelas características
- > Este tipo de controlo pressupõe que os materiais são aqueles que foram considerados no projecto
 - o controlo indirecto apenas assegura que para os materiais em causa as condições são as óptimas
- > Os materiais têm de ser escolhidos nas manchas de empréstimo

Controlo de compactação

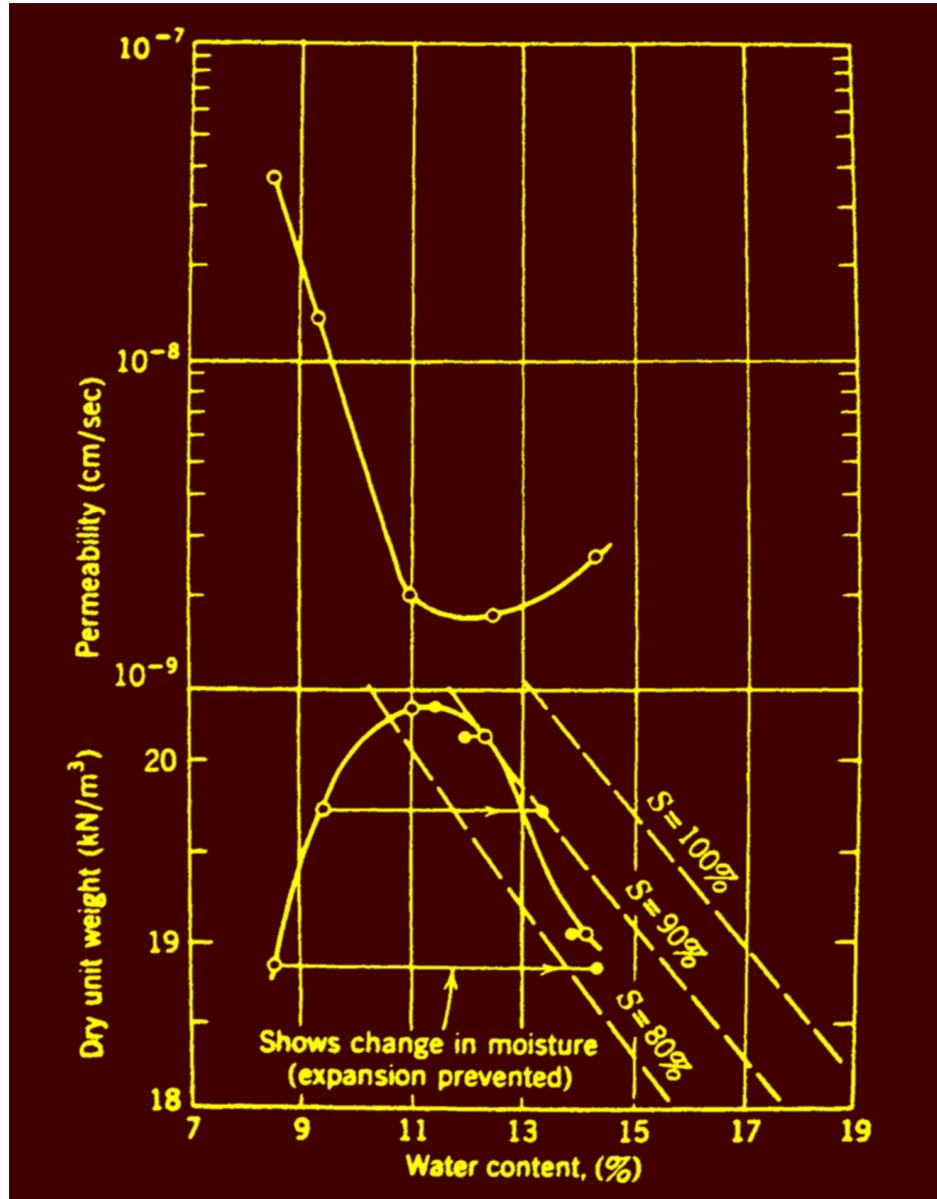
- > Reconhecimento dos materiais
- > Adequação dos equipamentos, materiais e método de controlo
 - aterro experimental
- > Definição do método de controlo
- > Frequência de ensaios / controlo
- > Tolerâncias
- > Interpretação de resultados

Em que consiste o controlo?

- > Consiste em verificar se as características de projecto estão a ser obtidas em obra
 - Peso próprio
 - Deformabilidade
 - Resistência
 - Permeabilidade (no caso das barragens)
- > As características dos solos dependem de forma directa do teor em água de compactação e da compactação relativa

$w\%$

> variação da permeabilidade com o grau de compactação



Em que consiste o controlo?

- > A par do controlo de compactação (sistemático) devem ser feitas outras verificações
- > Identificação (determinação de limites)
- > Análise granulométrica
- > Ensaios de corte em compressão triaxial em amostras intactas
- > Ensaios de permeabilidade

Controlo de compactação – determinação das grandezas no campo

> Determinação do peso volúmico aparente seco

- Garrafa de areia/volumímetro

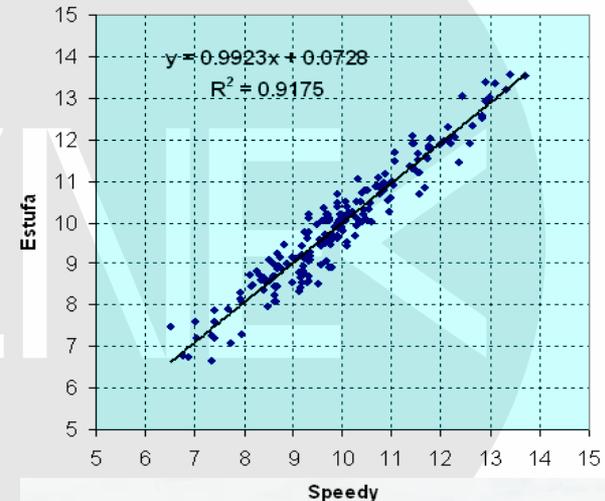
> Determinação do teor em água

- Secagem em estufa

o Operações demoradas (teor em água => 24h)

> Métodos mais espeditos

- Speedy → Calibração permanente



Controlo de compactação

- > Objectivo – determinar o peso específico seco e o teor em água, comparar com a curva padrão
 - Medir o volume escavado
 - o garrafa de areia*
 - o volumímetro*
 - Determinar o peso do solo proveniente da escavação
- > Determinar o teor em água do solo
- > Calcular o peso volúmico, verificar com a curva padrão
 - Curva padrão?



Métodos de controlo + habituais

> Gama densímetro (troxler)

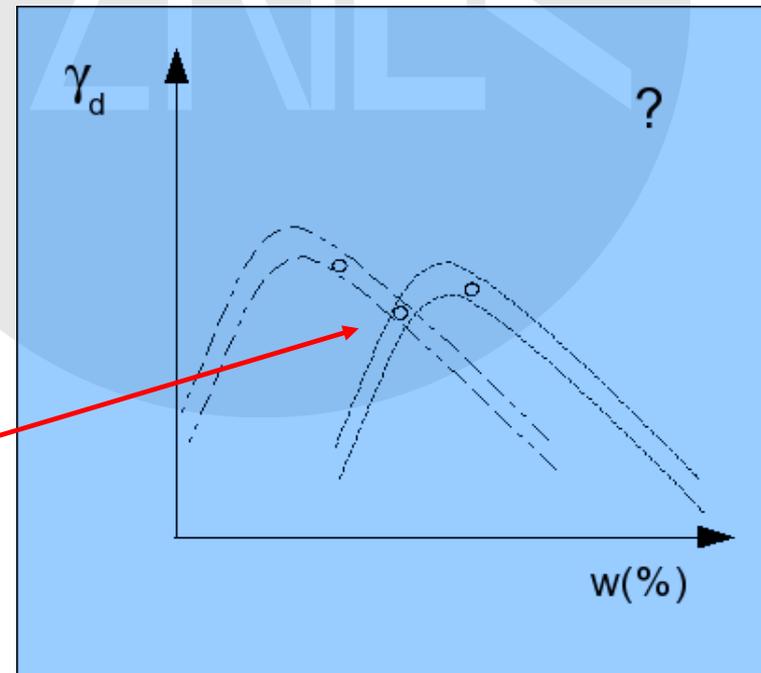
- muito popular na construção de rodovias
- permite a realização de um grande número de ensaios em pouco tempo
- comparando com outros métodos:
 - o *há variações importantes*
 - utilização incorrecta
 - falta de calibração
 - ensaio de referência
 - % de grossos
- não adequado para o controlo de construção de barragens



Método da família de curvas

- > Solo homogéneo → Família das curvas
- > ⇒ Manchas de empréstimo bem caracterizadas
 - Zonamento da mancha
 - Actualização permanente do zonamento
- > Dificuldades na identificação da curva
- > Experiência do operador

Neste caso a experiência do operador pode permitir identificar a curva (por exemplo se for possível verificar se o solo está húmido ou seco)



Método de Hilf

- > Método para determinar o grau de compactação e desvio do teor em água sem conhecer a curva do material
 - esta é determinada + tarde
- > Baseia-se na determinação da baridade de provetes compactados no molde proctor com diversos teores em água a partir do teor em água de compactação
- > Procedimento⇒

Método de Hilf

- > Fiável
- > Expedito (cerca de 1 hora, embora mais trabalhoso que o método da família de curvas)
- > Adequado para solos com maior variabilidade das suas características
- > Permite um controlo rigoroso do teor em água

Rejeições

- > A existência de rejeições (em determinado número) não é um sinal de má construção
- > É apenas um sinal de bom controlo
- > Não é normal não haver rejeições
 - pode ser um sinal de controlo mal feito

Permeabilidade

> Depende de:

- Granulometria
 - D_{10}

> Forma e textura das partículas

> Mineralogia

- Especialmente nos solos finos

> Índice de vazios

- Diferenças apreciáveis com o grau de compactação

> Grau de saturação

- Efeitos de sucção (solos parcialmente saturados podem baixar a permeabilidade de 1 ordem de grandeza)

> Fábrica

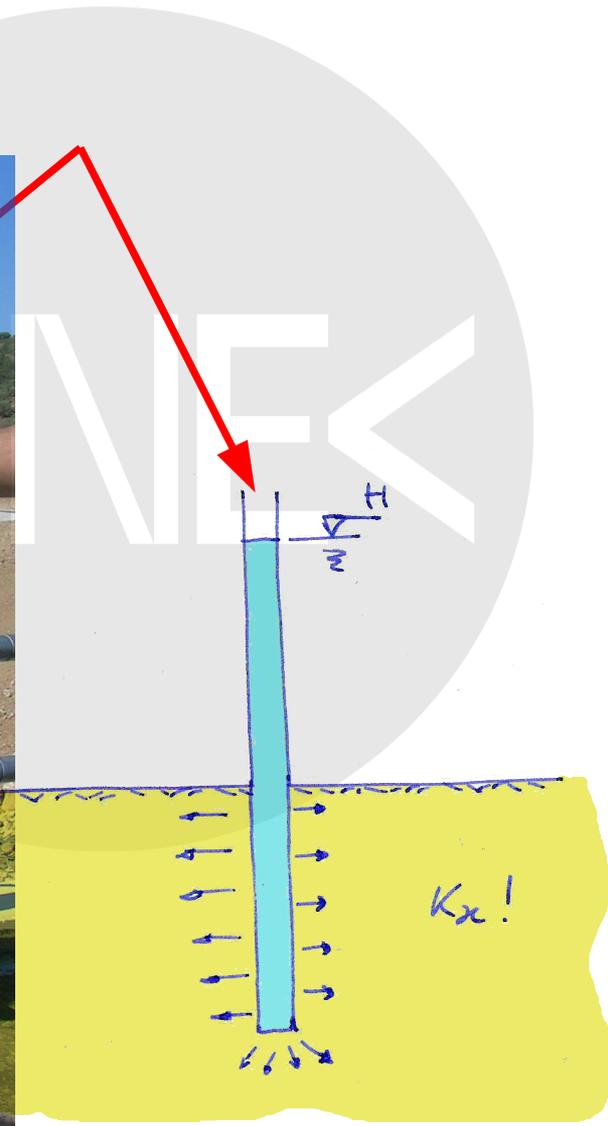
- A estratificação causa anisotropia de 10 ou 100x

> Tipo de fluido, temperatura, tipo de escoamento

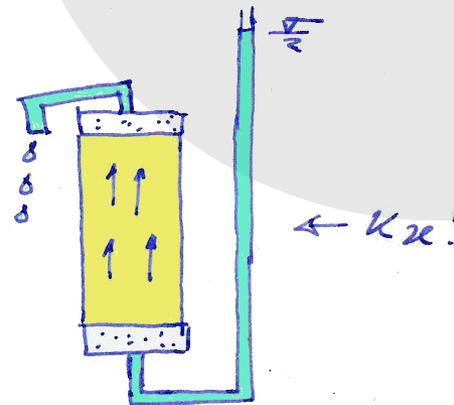
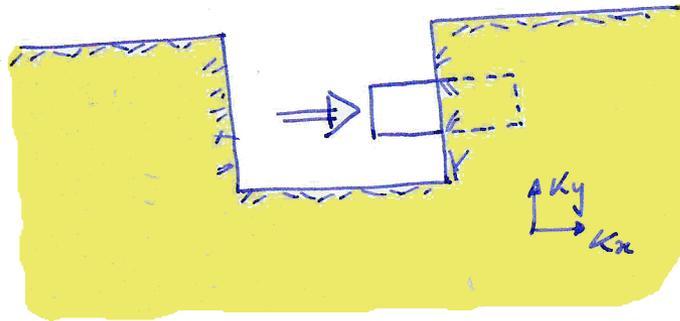
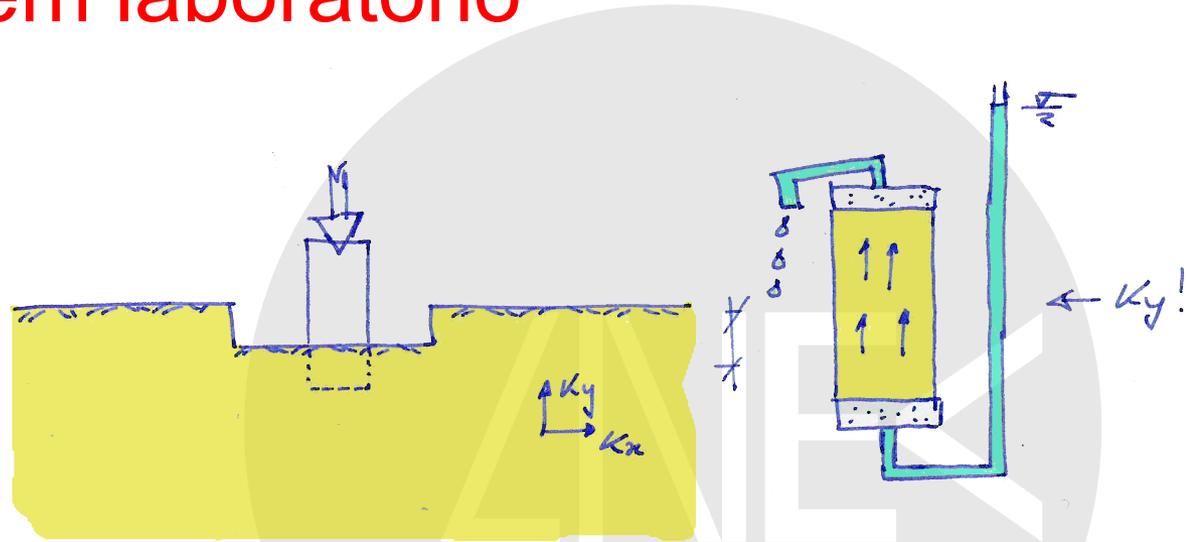
Permeabilidade

- > Nas formações in-situ normalmente há anisotropia de permeabilidade (também há anisotropia de comportamento mecânico)
- > Nos materiais de aterro as operações de compactação induzem anisotropia
- > Factor de 5 ou 10 x
- > Possível de medir em laboratório
- > Diferença entre ensaios de laboratório e ensaios de campo

Ensaio de permeabilidade no campo



Colheita de amostras para determinação da permeabilidade em laboratório





Observação de barragens de aterro

João Marcelino
LNEC - DG/NBOA

Sumário

- > Objectivos da observação
- > Definição do plano de observação
- > Equipamentos, Instalação, Leituras

Objectivos

> Os objectivos fundamentais da observação são:

0) Segurança

- ✓ as barragens são estruturas que acarretam um risco elevado ($\text{Risco} = \text{probabilidade} \times \text{consequências}$)

1) Previsão do comportamento futuro

- ✓ muitas vezes o melhor modelo é aquele que se baseia no comportamento anterior
- ✓ os comportamentos diferidos devem ser calibrados com base em dados reais

2) Verificação dos modelos e critérios de dimensionamento

- ✓ a recolha de dados sobre os comportamentos associados a determinadas opções de projecto permite melhorar o conhecimento

grandezas a medir & factores que afectam leituras

> Acções

- Nível da albufeira
- Pluviosidade
- Acções sísmicas
- Cota aterro

> Deslocamentos e extensões (velocidades e acelerações)

> Tensões

- Totais
- Pressões intersticiais

> Caudais

> Inspecção visual

Causa



Medição do efeito

Pequenas barragens

- > Medição do NAA
- > Caudais
- > Deslocamentos?
- > Inspeção visual

> Registos

- tabelas com leituras
- Fotografias
- Fichas de inspecção

Controlo de segurança?

> comparação entre o comportamento real (observado) e o comportamento esperado, normalmente estabelecido através de modelos

> Modelos

- Os modelos conceptuais consistem, essencialmente, no estabelecimento da resposta esperada para a a barragem, com base na consideração conjunta dos aspectos relativos à sua concepção e os do comportamento exibido por obras semelhantes.
- Matemáticos
- Estatísticos (semi empíricos) – baseados no historial anterior

previsão da magnitude de variação

> fundamental para escolher equipamentos

- valores máximos-definem alcance dos equipamentos
- valores mínimos-definem sensibilidade e precisão

> fundamental para definir critérios de alerta e medidas correctivas

- ex: crescimento excessivo da pressão intersticial-paragem da construção

localização

> pressupõe conhecimento pormenorizado da obra/projecto

- escolher zonas sensíveis
- escolher zonas representativas
- escolher zonas onde haja descontinuidades
- escolher zonas de referência (para comparação)
- cobrir as restantes áreas

> questões a considerar:

- perturbação na construção
- protecção durante a construção
- protecção vandalismo

selecção de instrumentos

- > fiabilidade
- > entre dois dispositivos semelhantes escolher o mais simples
- > custo inicial mais reduzido \Rightarrow custo real mais reduzido
- > os equipamentos normalmente representam uma pequena parcela da "observação"
- > os equipamentos são elemento estranhos na barragem
- > caminhos de cabos, etc, especialmente no sentido m-j podem ser problemáticos

automatização?

- > mais disponível com as novas tecnologias
- > complementa o sistema de observação
- > não dispensa as inspecções visuais
- > interfere com a selecção de instrumentos

validação de dados

- > fundamental para garantir funcionamento e utilidade do sistema
- > procedimento de leitura
- > inspecção dos equipamentos
- > verificação limites dos equipamentos
- > comparação com leituras anteriores
- > comparação com outras grandezas

- > repetição

Nível da albufeira

- > Escala limnimétricas
 - visibilidade
- > Limnígrafos (registo contínuo (flutuadores, pneumático, etc.))
- > Transdutores de pressão





Meteorologia



- > Precipitação
- > Vento
- > Temperatura

Medição de deslocamentos

> Externos

- Marcas superficiais
 - Nivelamento
 - triangulação
- Varrimento laser

> Internos

- Placas de assentamento
- Baterias de assentamento
- Inclínómetros
- Níveis hidráulicos
- Extensómetros de varas

Deslocamentos externos

Métodos

> Topográficos

- Nivelamento
 - o *décima de mm*
- Triangulação, alinhamentos
 - o *2 a 3 mm*

> Leituras discretas

- pontos de apoio
 - o *2 por margem*
 - o *pontos alvo*
 - o *pontos auxiliares*

> Laser

- Tecnologia emergente
- Leitura essencialmente contínua
- Associado à imagem

> Precisão inferior

> Em desenvolvimento

Marcas superficiais

- > Tacos de nivelamento-medição de assentamentos



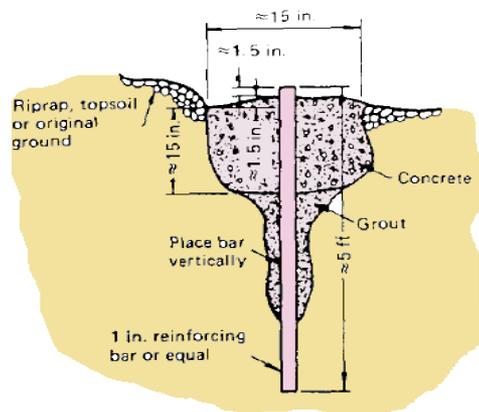
Marcas superficiais



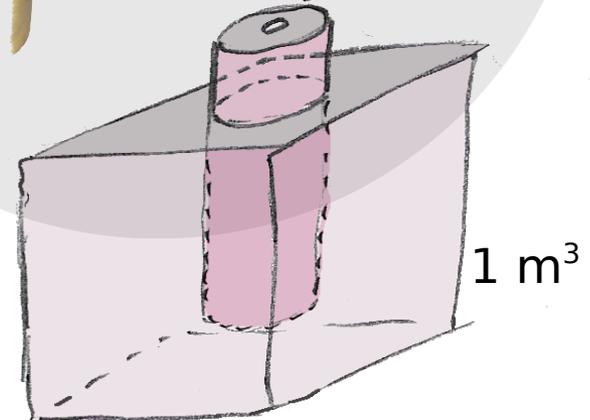
Execução

> As marcas superficiais devem ser perfeitamente solidárias com o aterro

- simples taco de nivelamento (fundado a 1,5m)
- maciço com 1 m³ + manilha + peça centragem



Centragem força



Pontos de referência

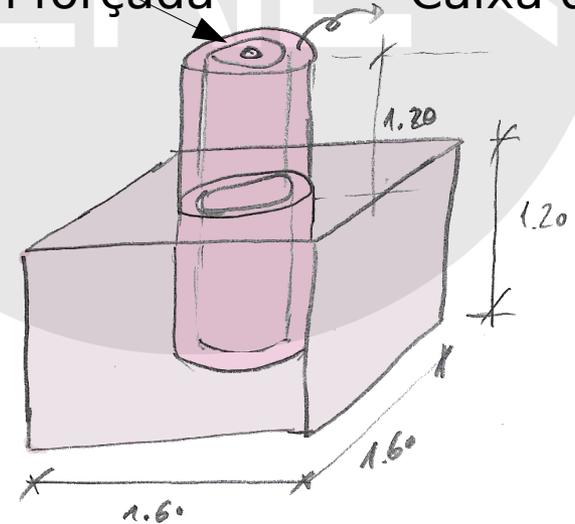
> Os pontos de referência devem ser criteriosamente escolhidos

- visibilidade
- estabilidade
- não afectados pela albufeira

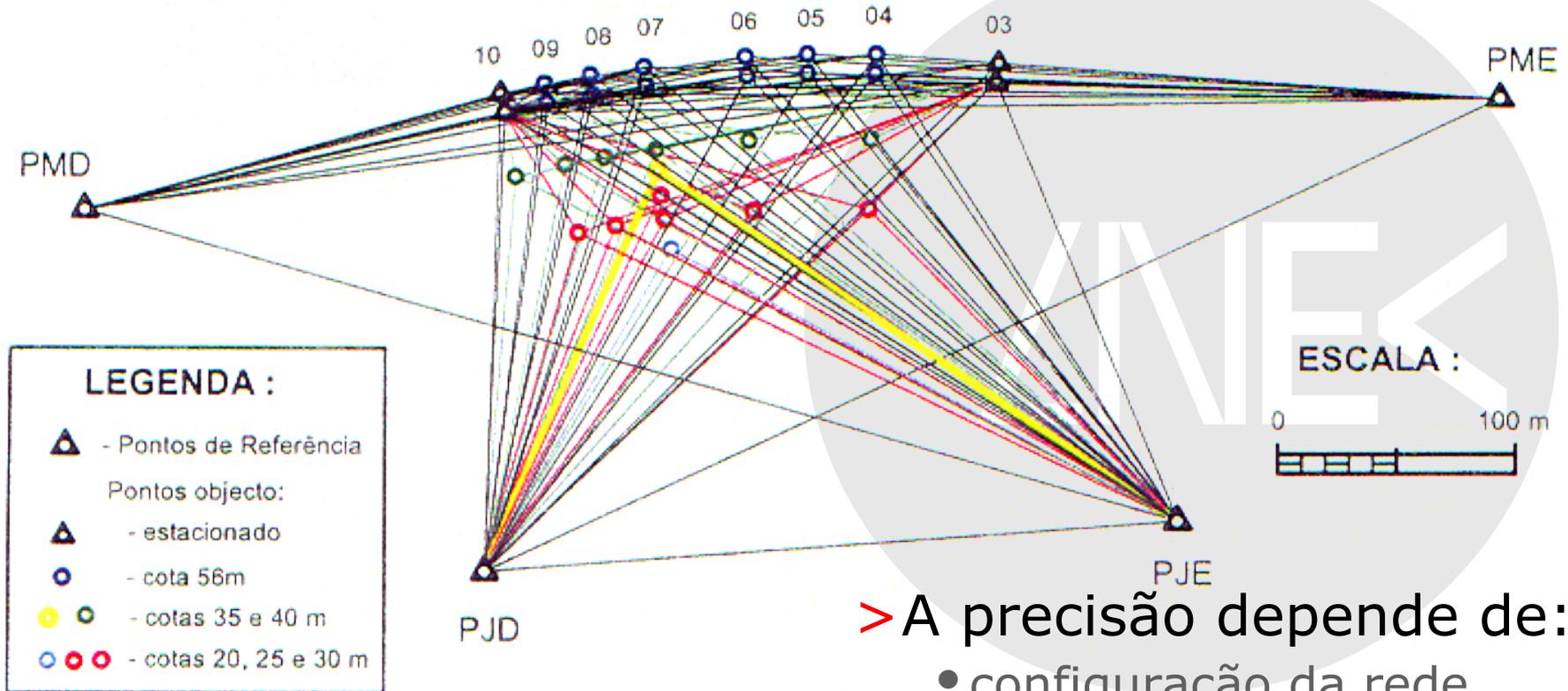


centragem forçada

Caixa de ar



Rede de triangulação



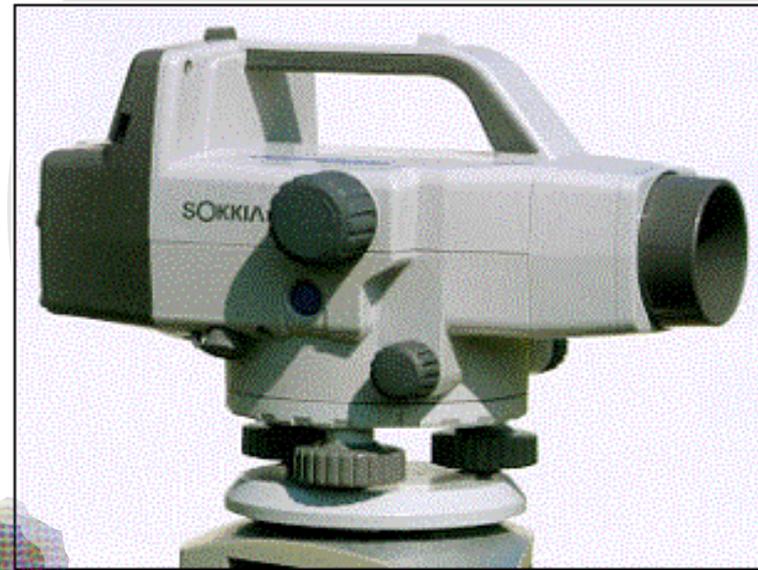
- > A precisão depende de:
- configuração da rede
 - equipamentos
 - procedimentos

Equipamentos de medição

> Estação total



> Nível



Varrimento laser



Varrimento laser

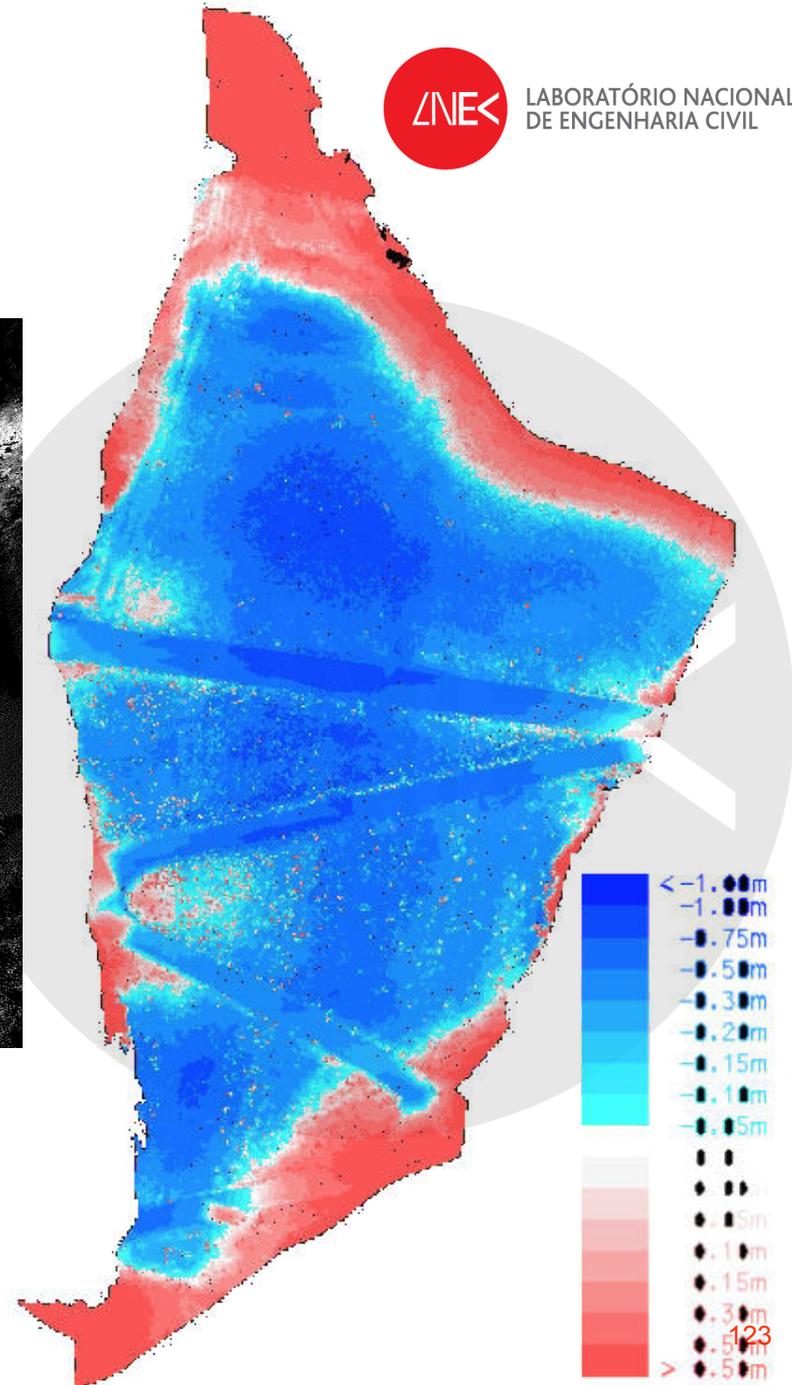
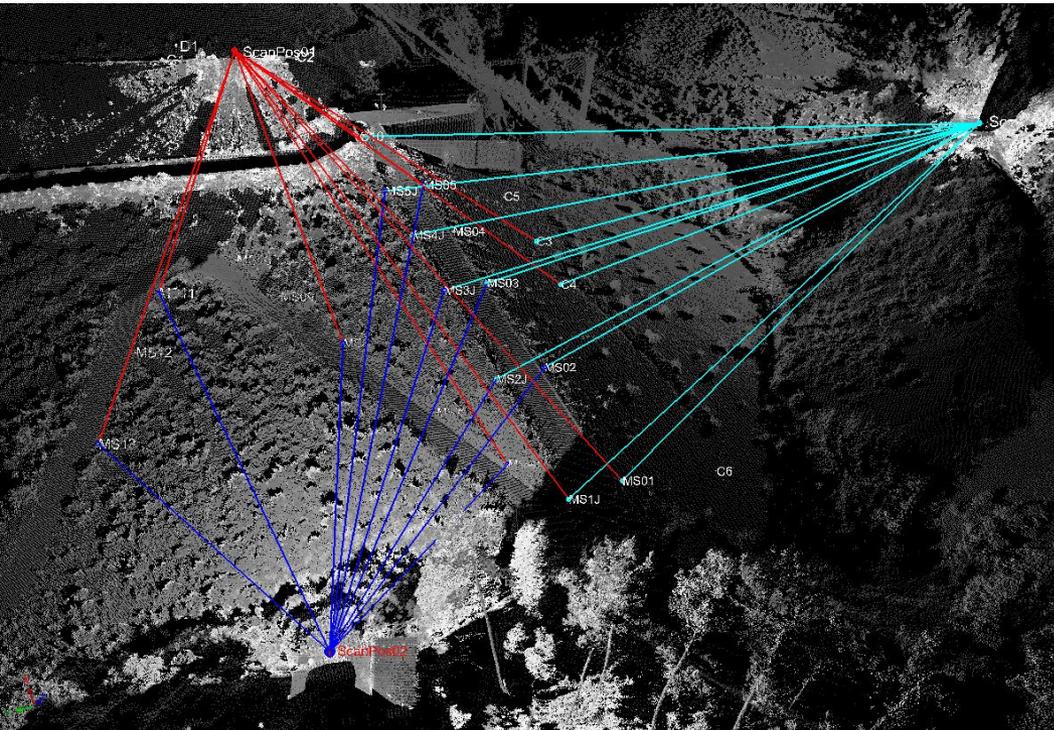
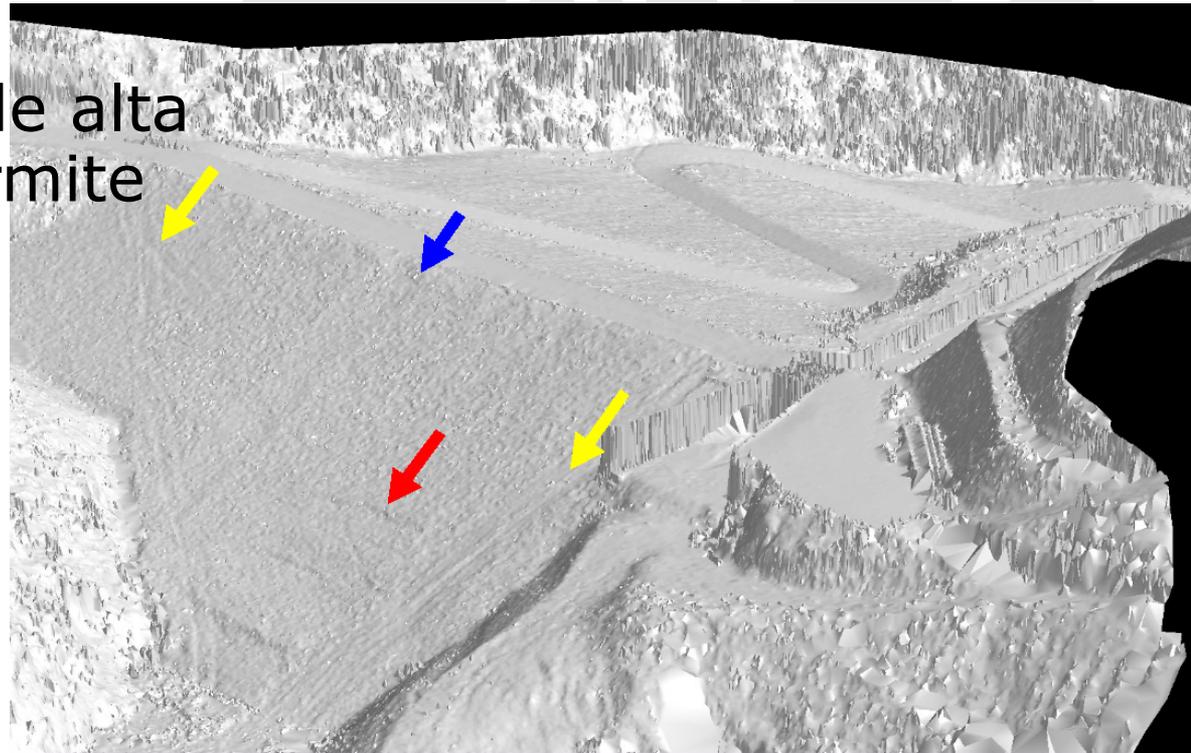


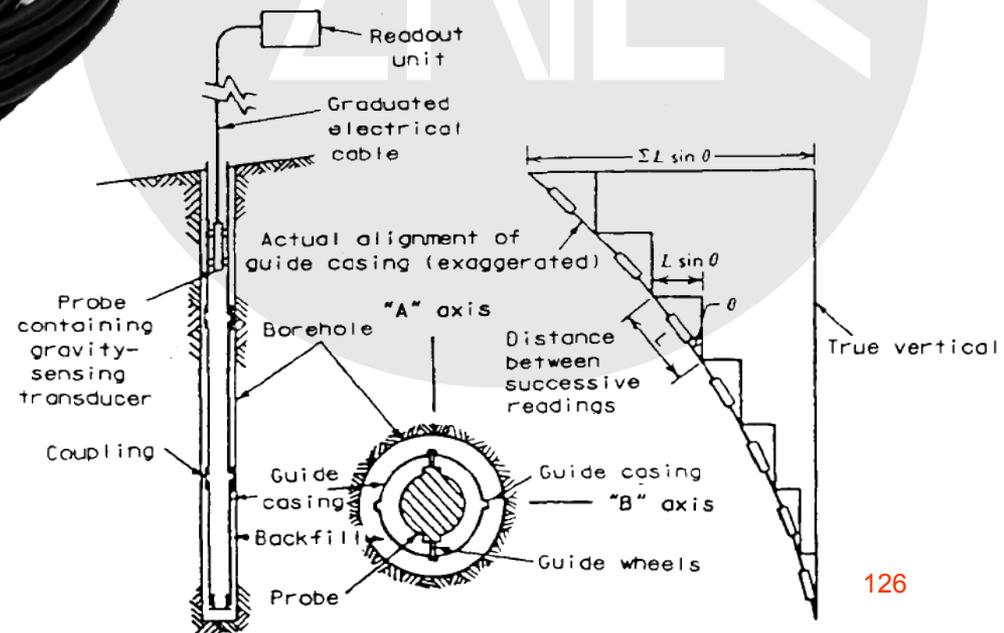
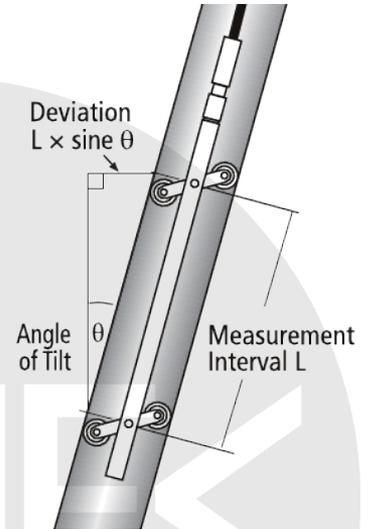
Imagem virtual, 3D

- > Rápido
- > milhões de pontos
- > precisão melhor que 1 cm
- > imagem colorida de alta definição a 3D permite "visita" virtual



Deslocamentos internos

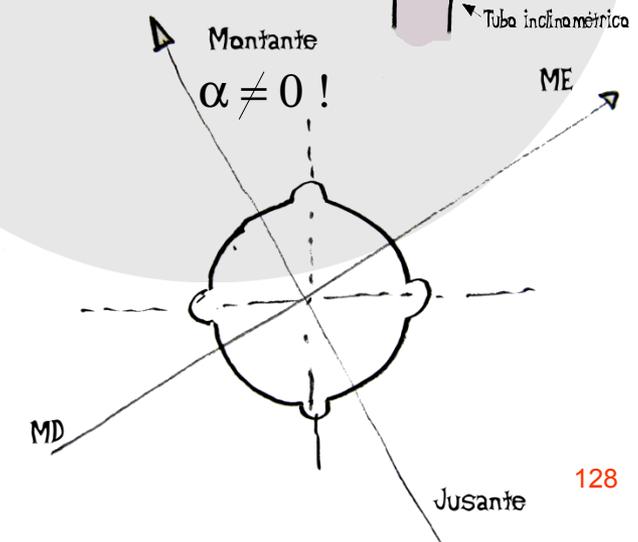
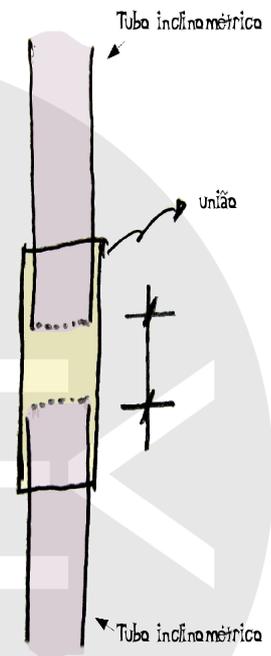
Inclinómetros





Cuidados na instalação

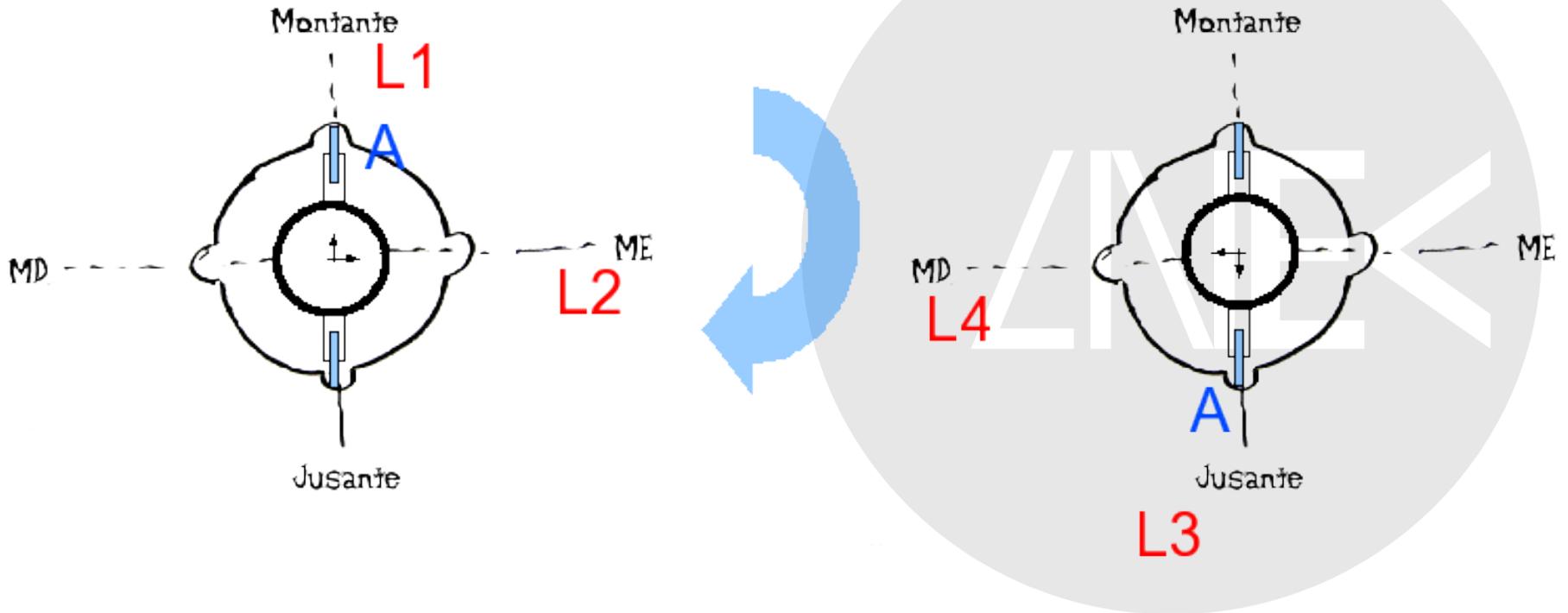
- > orientação correcta
- > folga nas uniões
- > verticalidade (geometria inicial)
- > protecção durante a construção dos aterros
- > compactação à volta
- > furação sem água

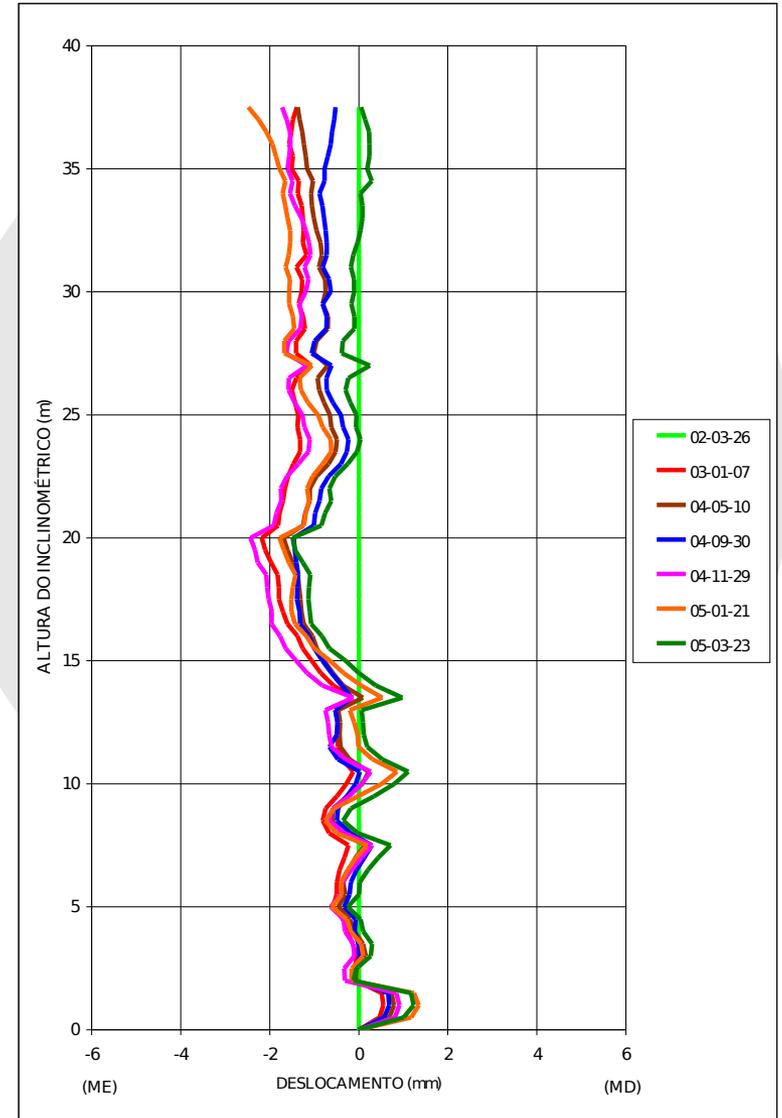
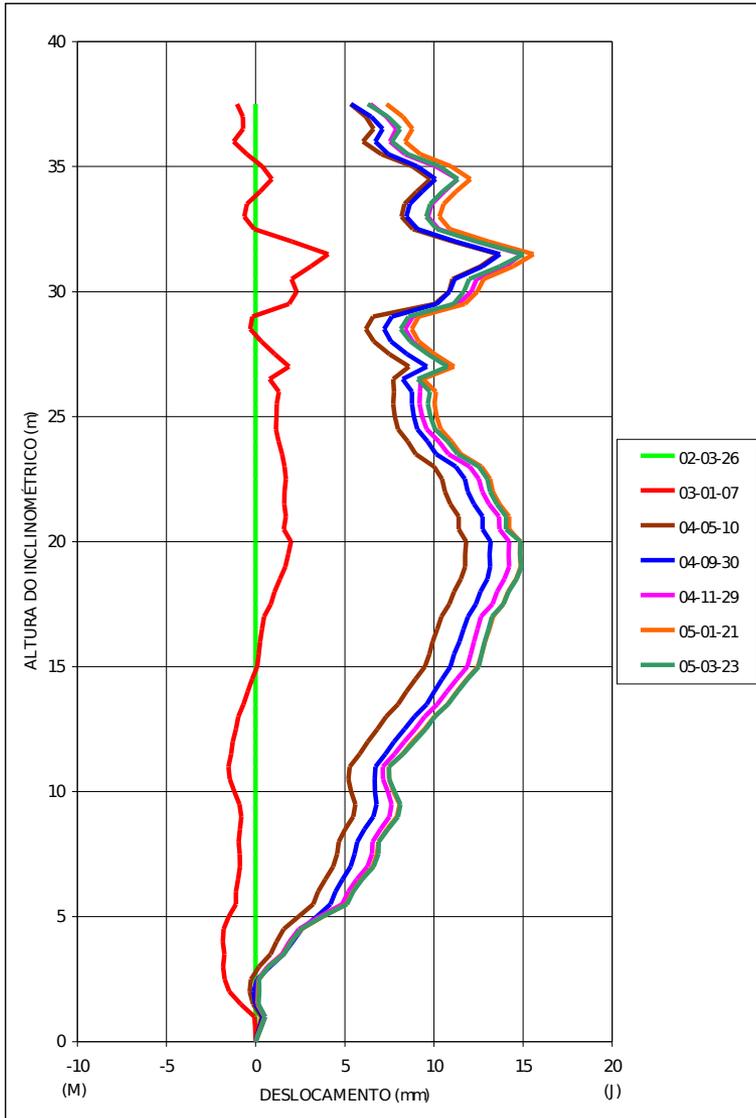


unidade de leitura



Forma correcta de efectuar leituras





Inclinómetros inclinados

- > No paramento de barragens com cortina podem-se instalar inclinómetros inclinados
- > final da construção



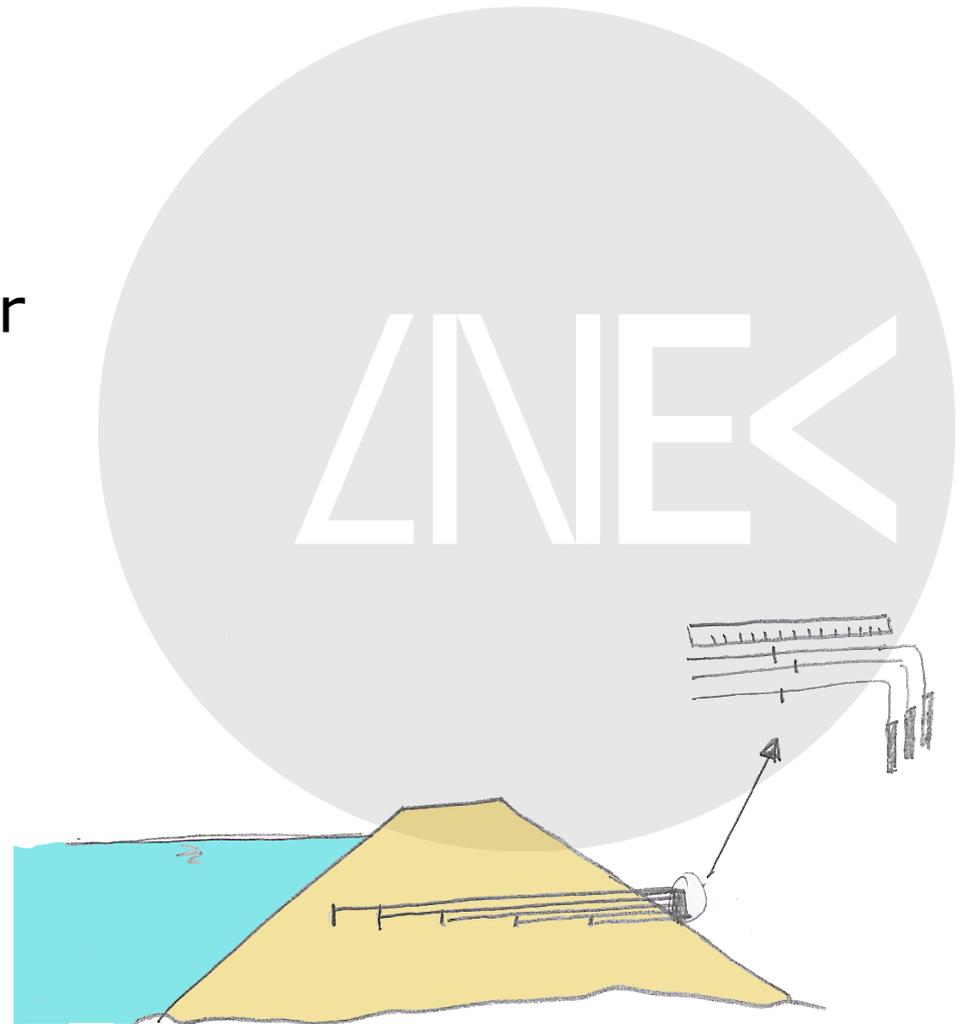
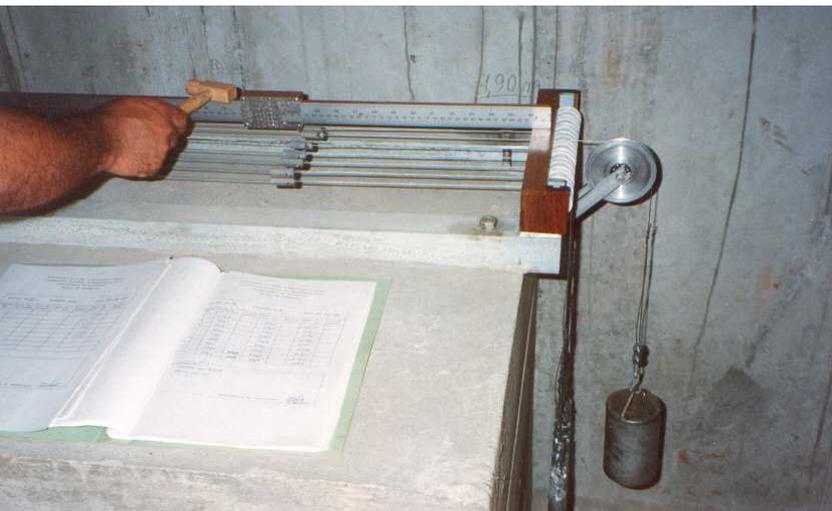
Procedimento de leitura



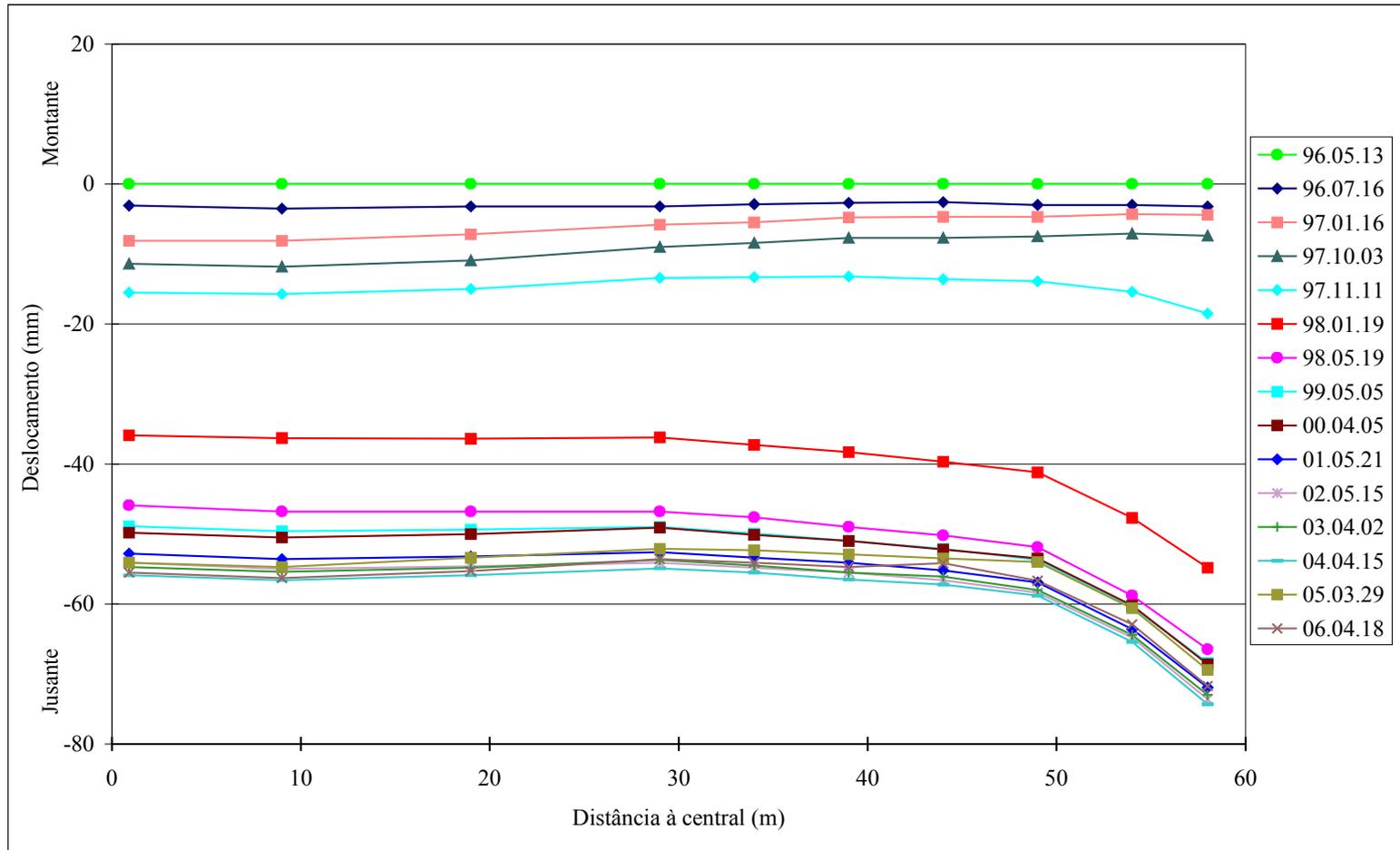
Extensómetros



- > montagem durante a fase construtiva
- > simples de automatizar



Resultados



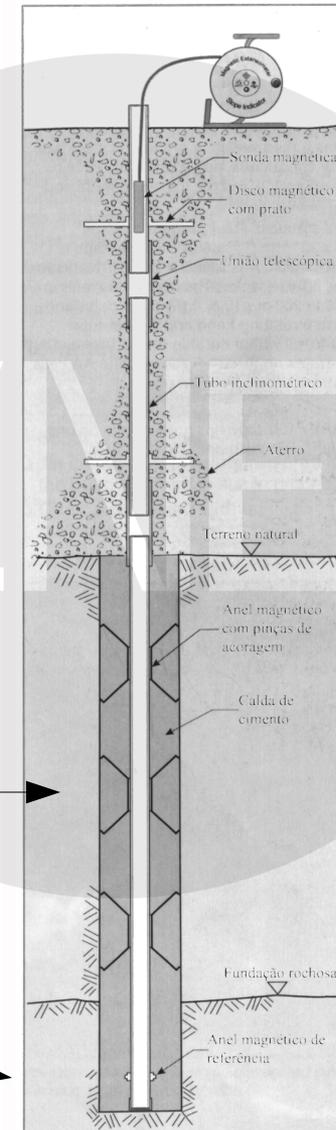
Assentamentos internos

- > em tubos verticais
- > em tubos horizontais
- > extensómetros de fios e varas
- > células de assentamento
- > placas de assentamento
- > níveis hidráulicos



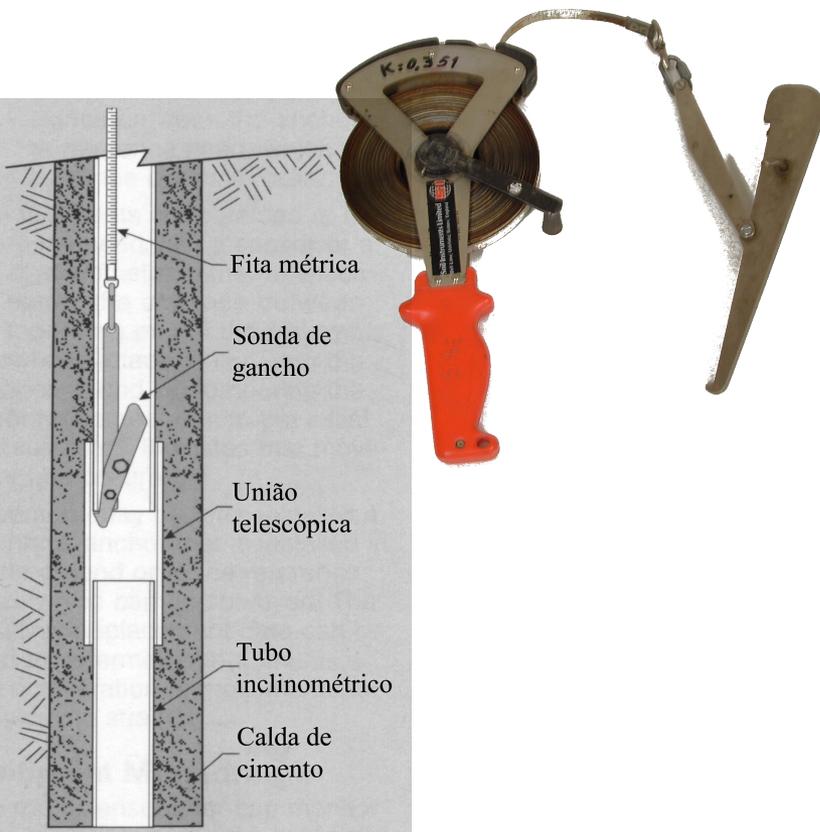
em tubos verticais

- > leitura com sonda
- > tubos de inclinómetro
 - usbr
 - gancho
 - magnética

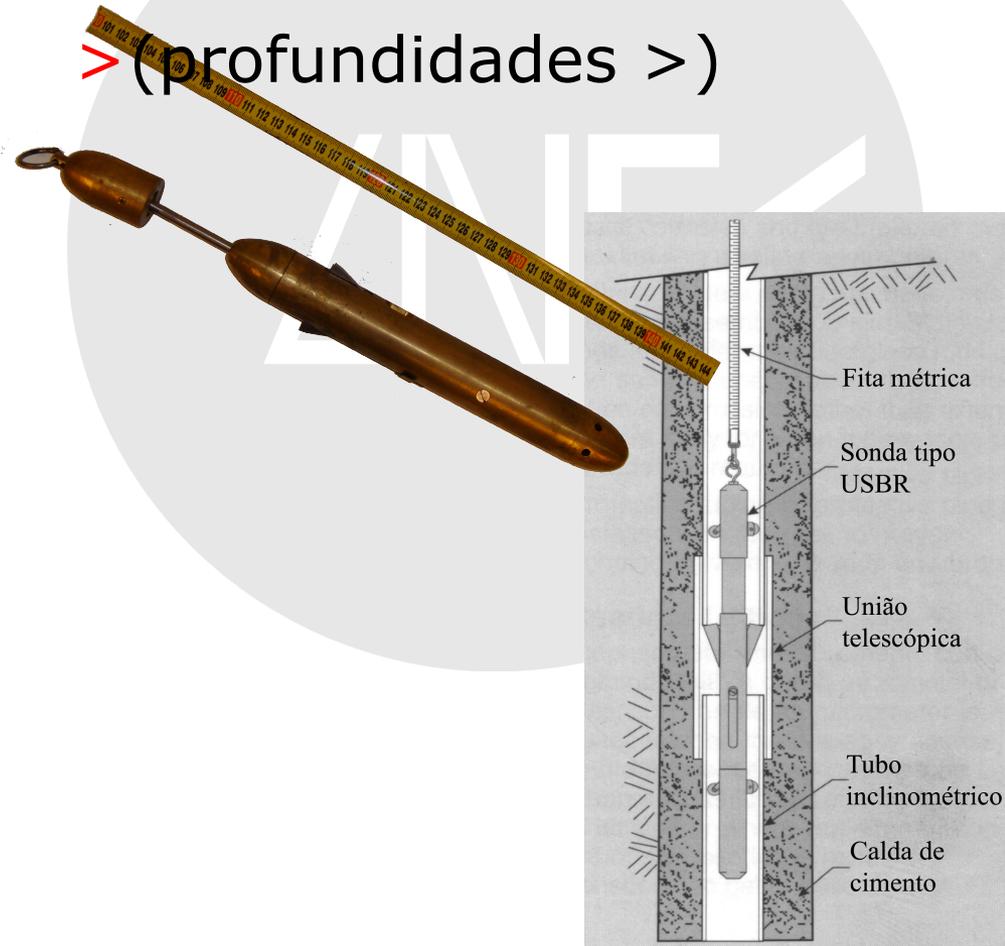


em tubos verticais – equipamentos de medição

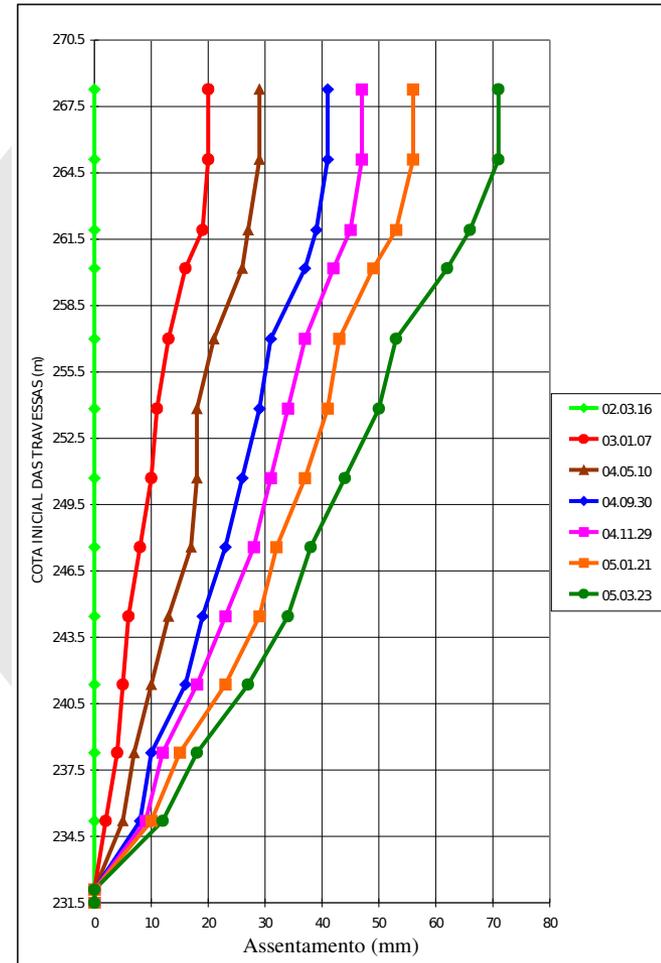
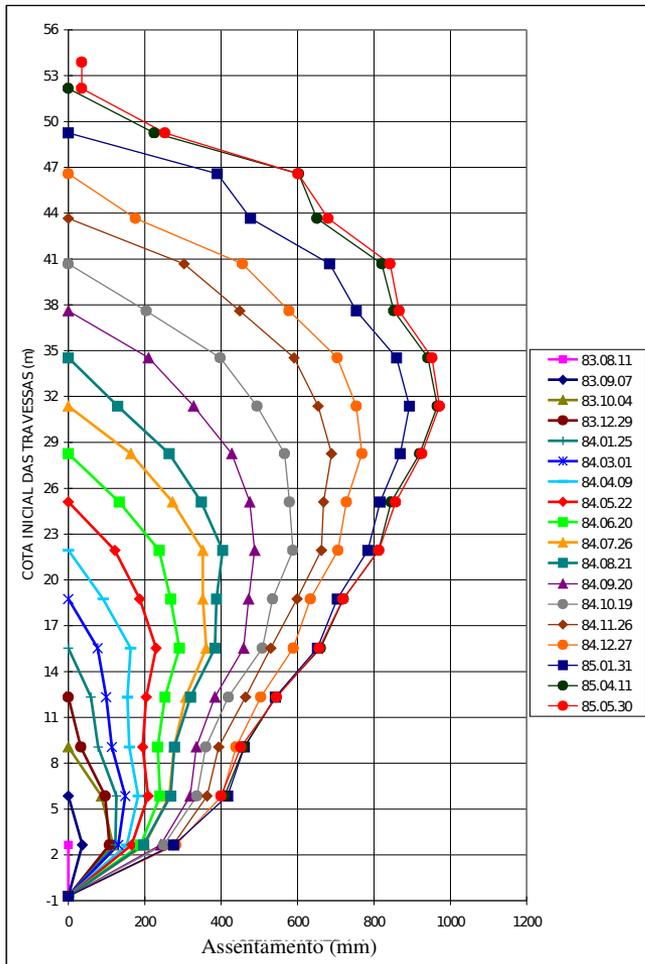
- > “gancho”
- > (profundidades <)



- > sonda “USBR”
- > (profundidades >)



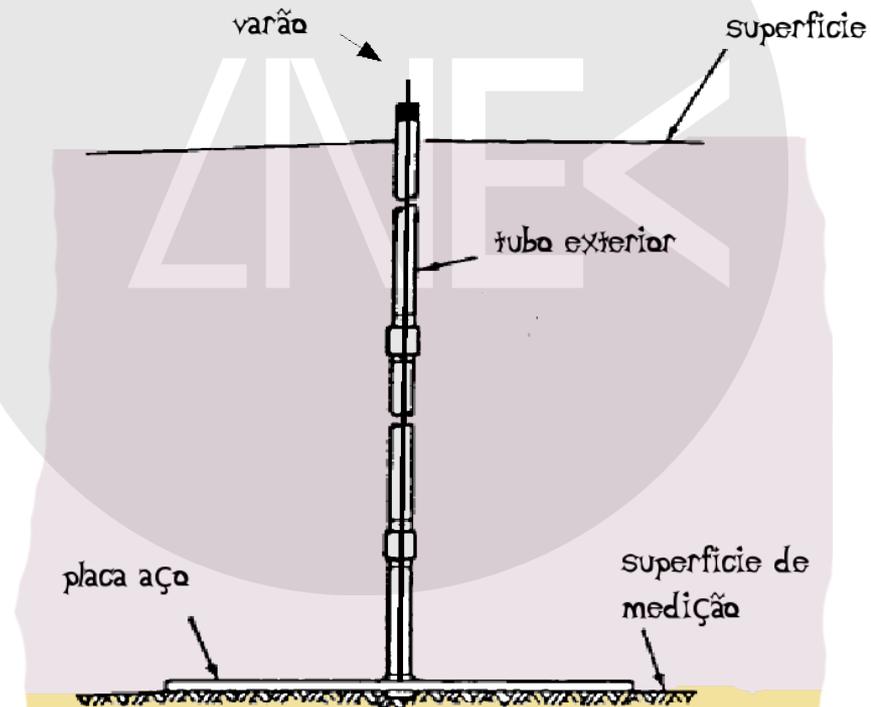
Diagramas



Placas de assentamento

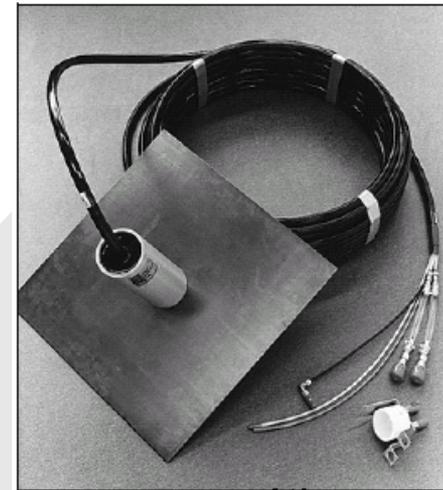


> necessita "uma vertical"



Células de assentamento

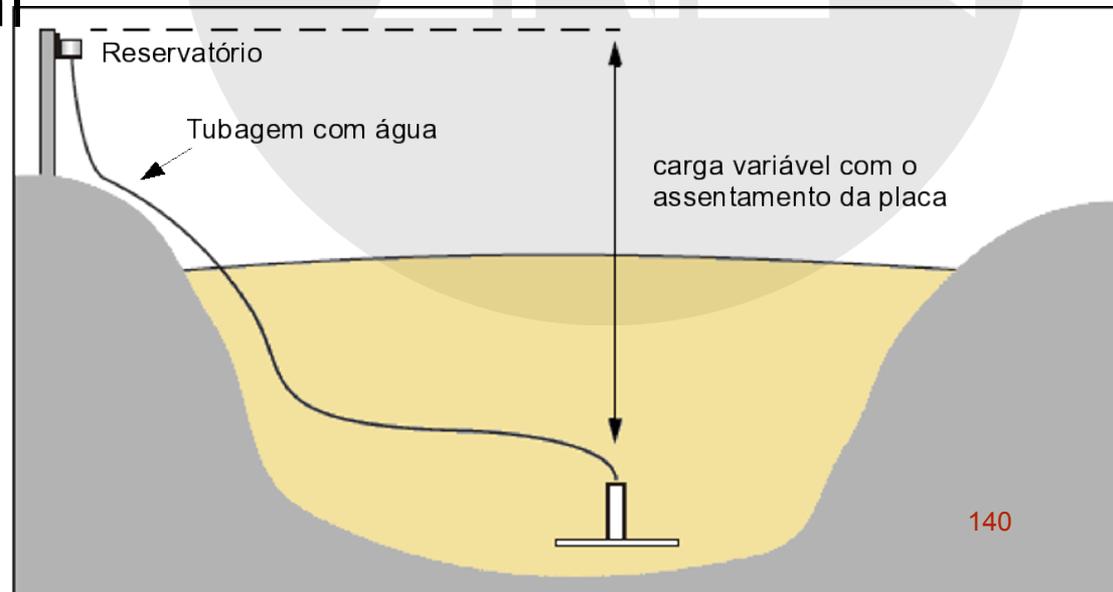
- > determinação da carga hidráulica relativamente a um ponto de conhecido
- > não necessita alinhamento vertical
- > + dispendioso
- > automatizável
- > (pneumático, corda vibrante)



pneumático



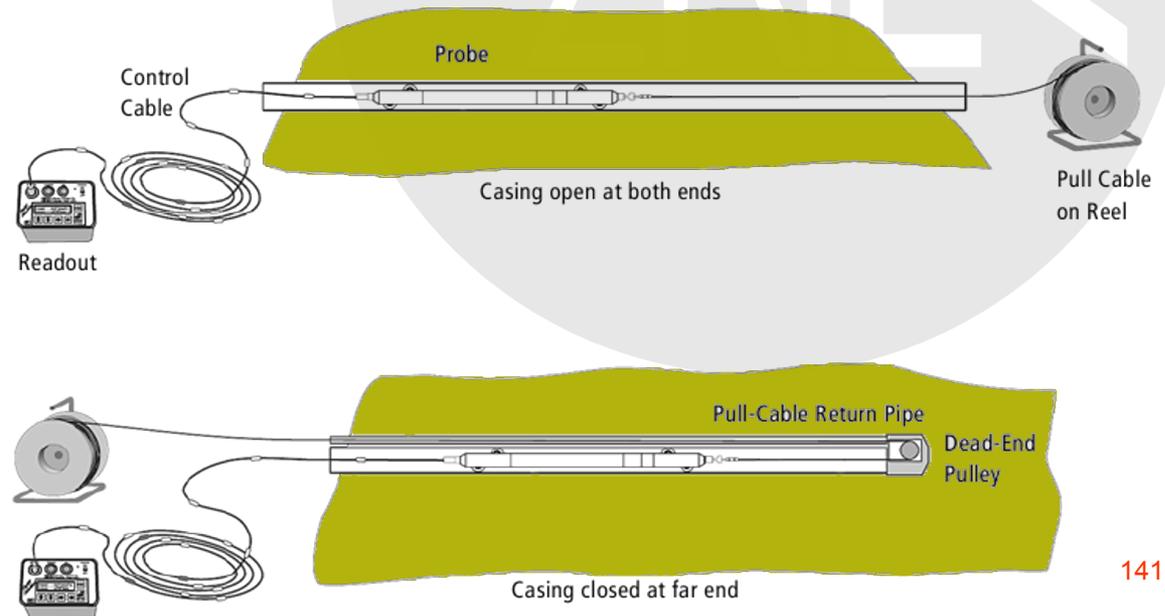
corda vibrante



Inclinómetros horizontais

- > medição de deslocamentos ao longo de uma linha
- > instalação durante a fase construtiva

- > permite obter um perfil de assentamento

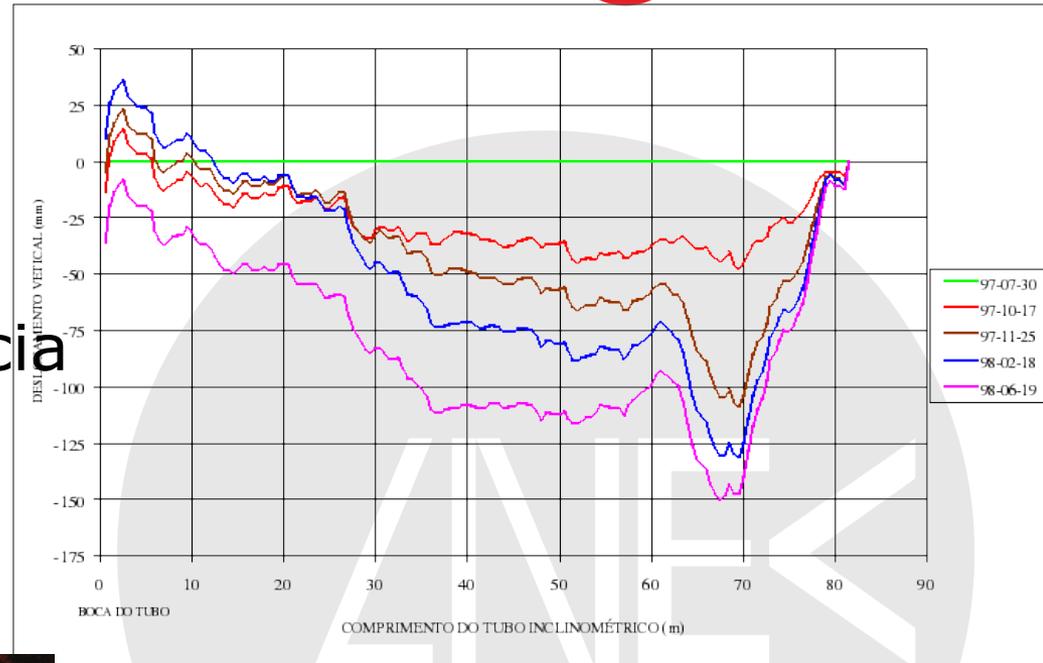


Montagem

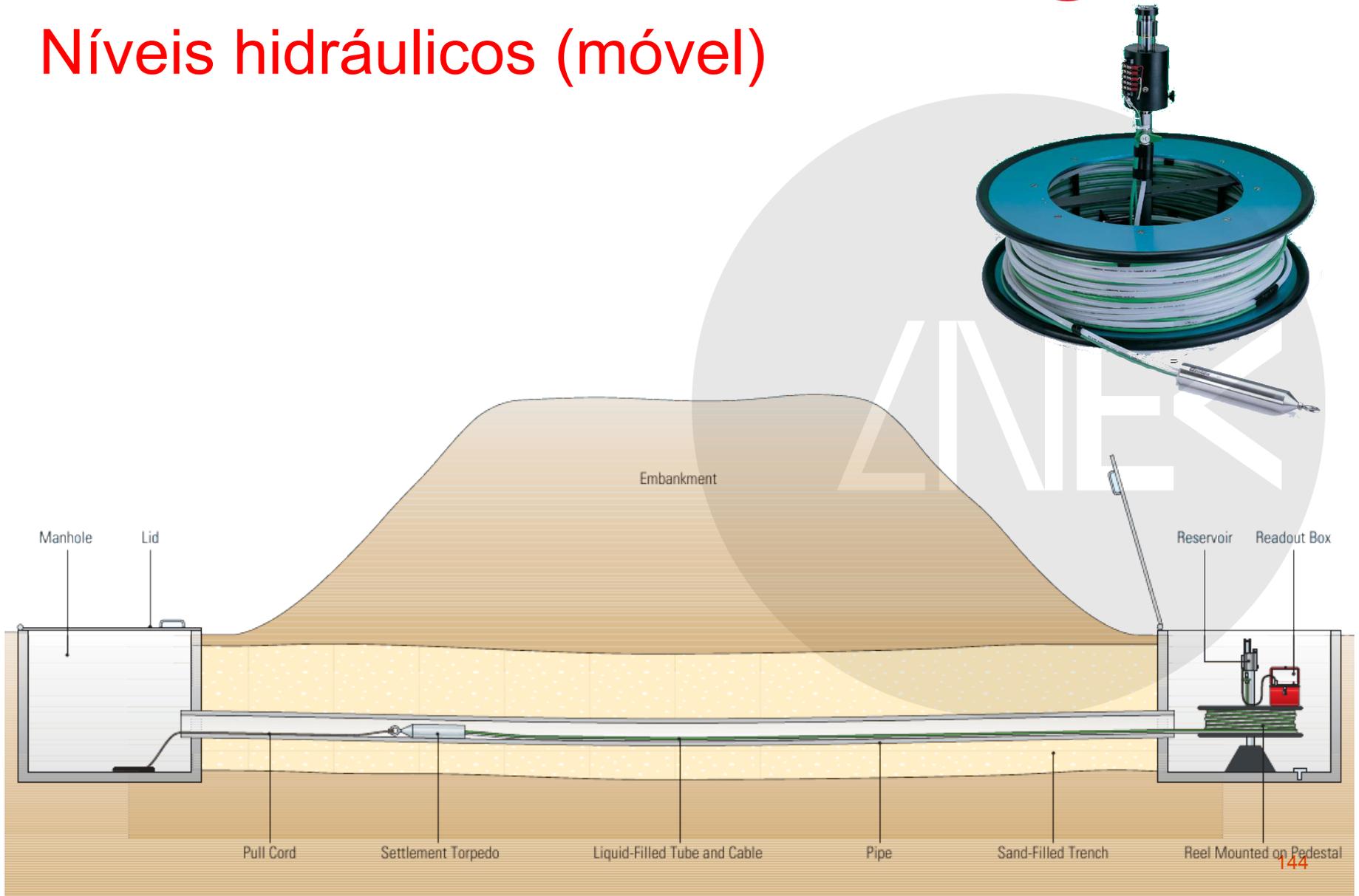


Leituras

> variação relativa à
campanha de referência



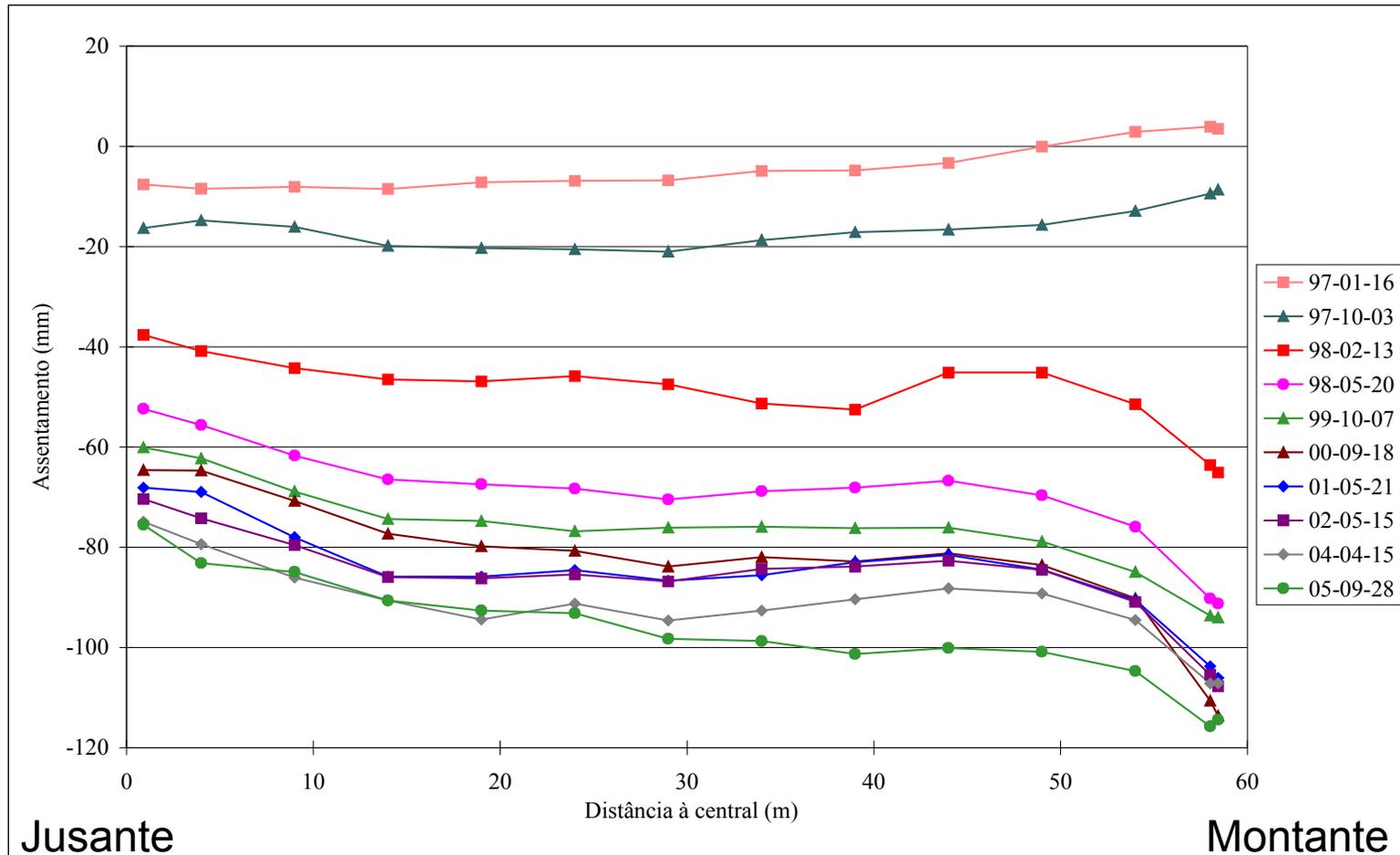
Níveis hidráulicos (móvel)



Instalação, protecção e central

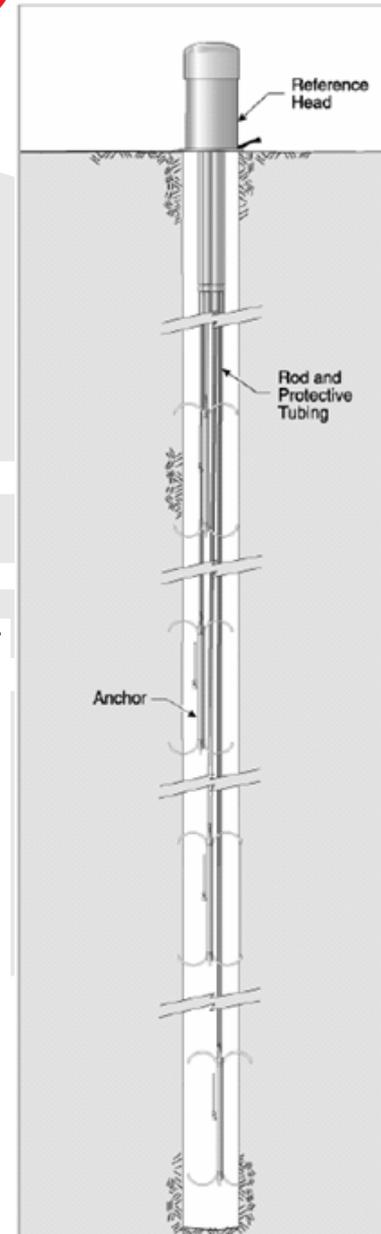
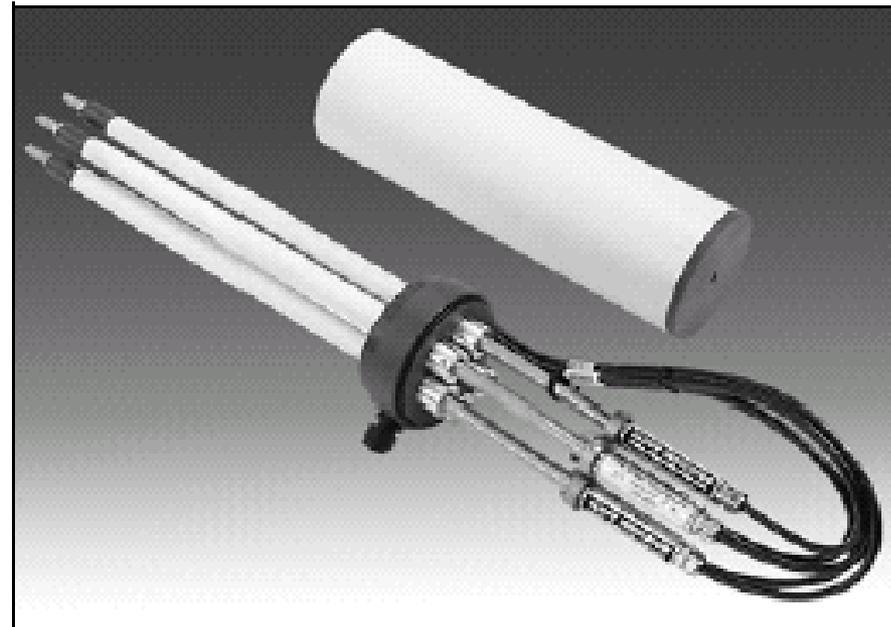


Leituras



Extensómetro de varas

- > Instalação em furo de sondagem
- > n^o limitado de pontos de medição



Tensões e pressões

Medição de tensões

> Totais

- Células de tensão total

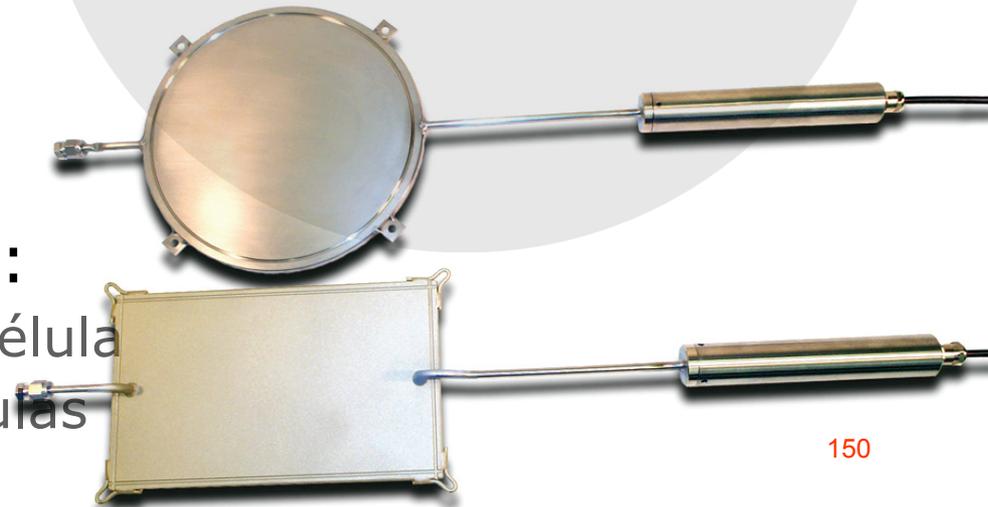
> Pressões intersticiais

- Piezómetros hidráulicos
- Piezómetros eléctricos
 - o *corda vibrante*
 - o *extensómetro*
- Piezómetros pneumáticos

Células de tensão total

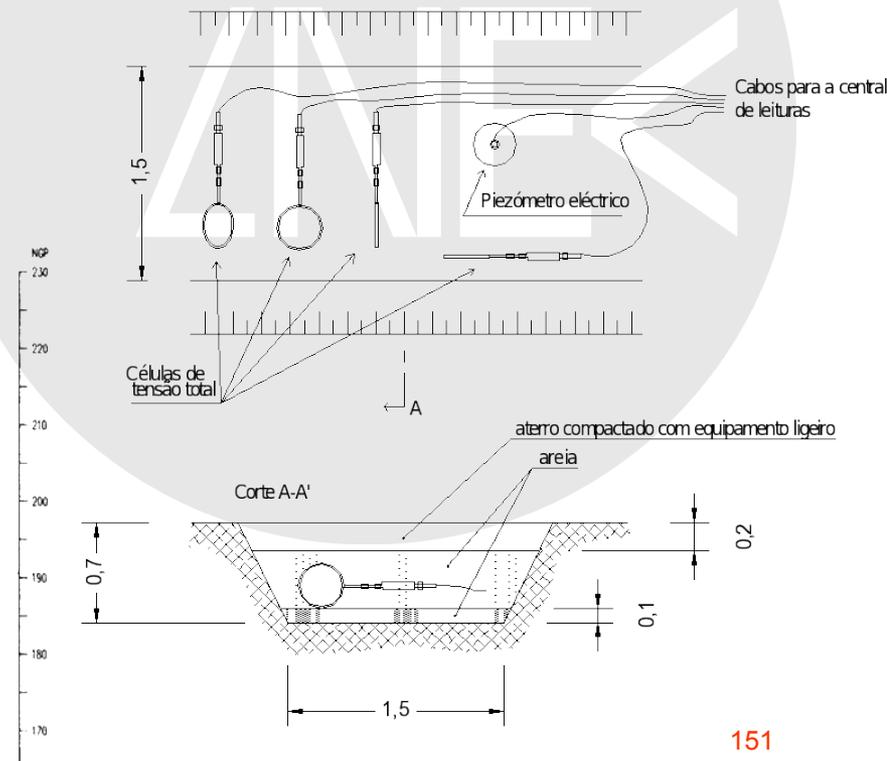
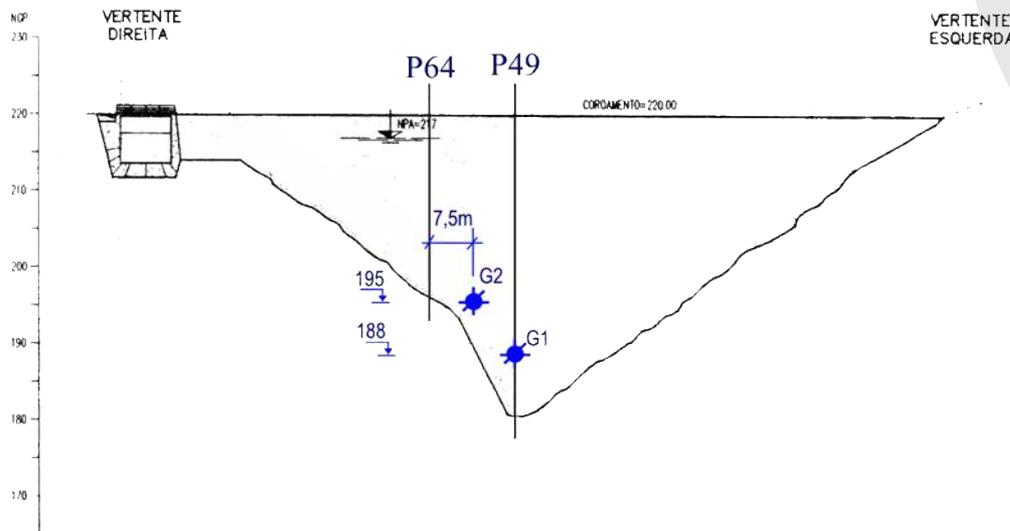
- > Medição da tensão no corpo da barragem
 - > Dificuldades associadas com a presença do equipamento
 - > A instalação deve procurar minimizar as alterações
-
- > Aspectos a considerar:
 - relação rigidez aterro/célula
 - dimensão célula/partículas
 - efeitos de colocação

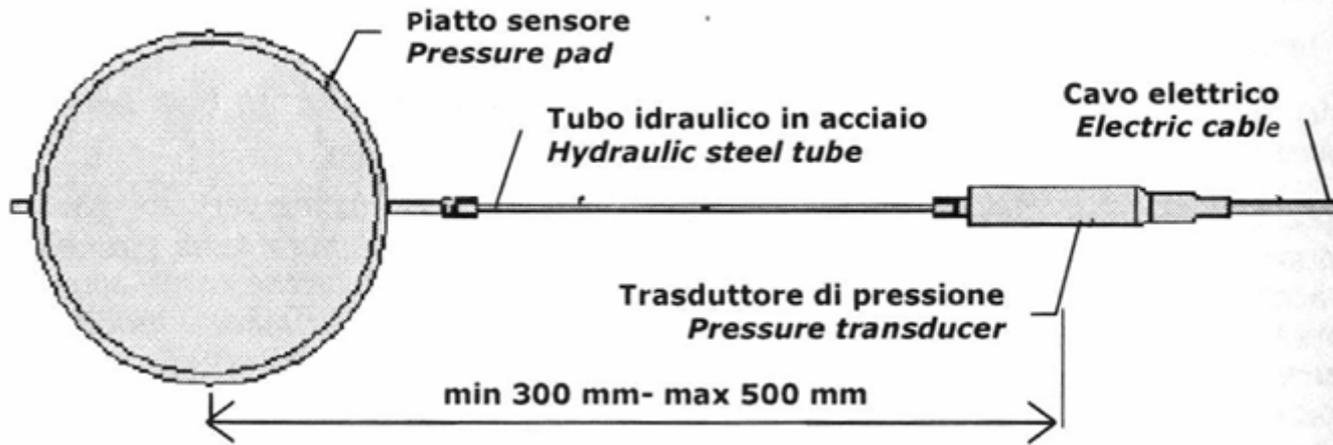
- > de diafragma
 - corda vibrante
 - com extensómetros
 - piezoeléctrica
 - transdutor deslocamento
- > hidráulicas



Instalação

- > caminhos dos cabos
- > garantia de orientação correcta das células
- > compactação adequada



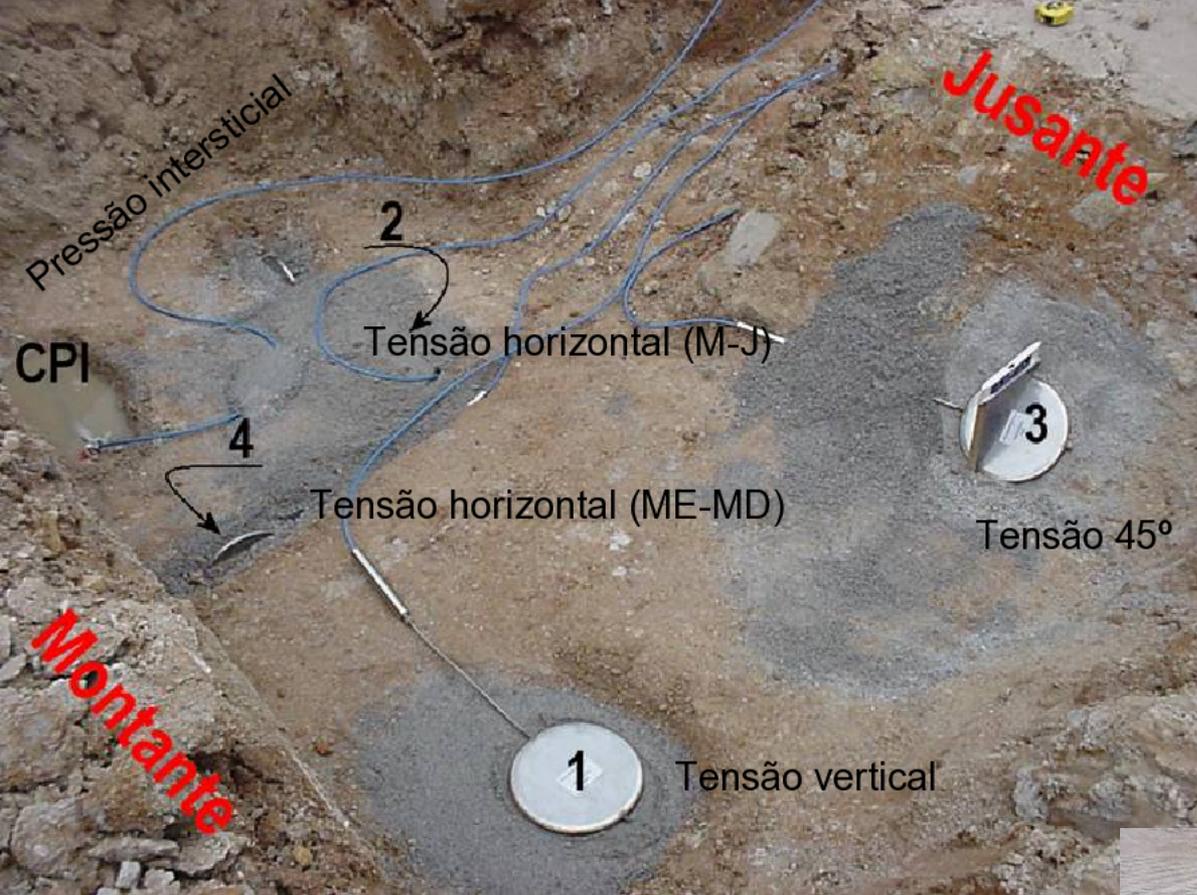


> Célula hidráulica

- verificação &
- leitura inicial

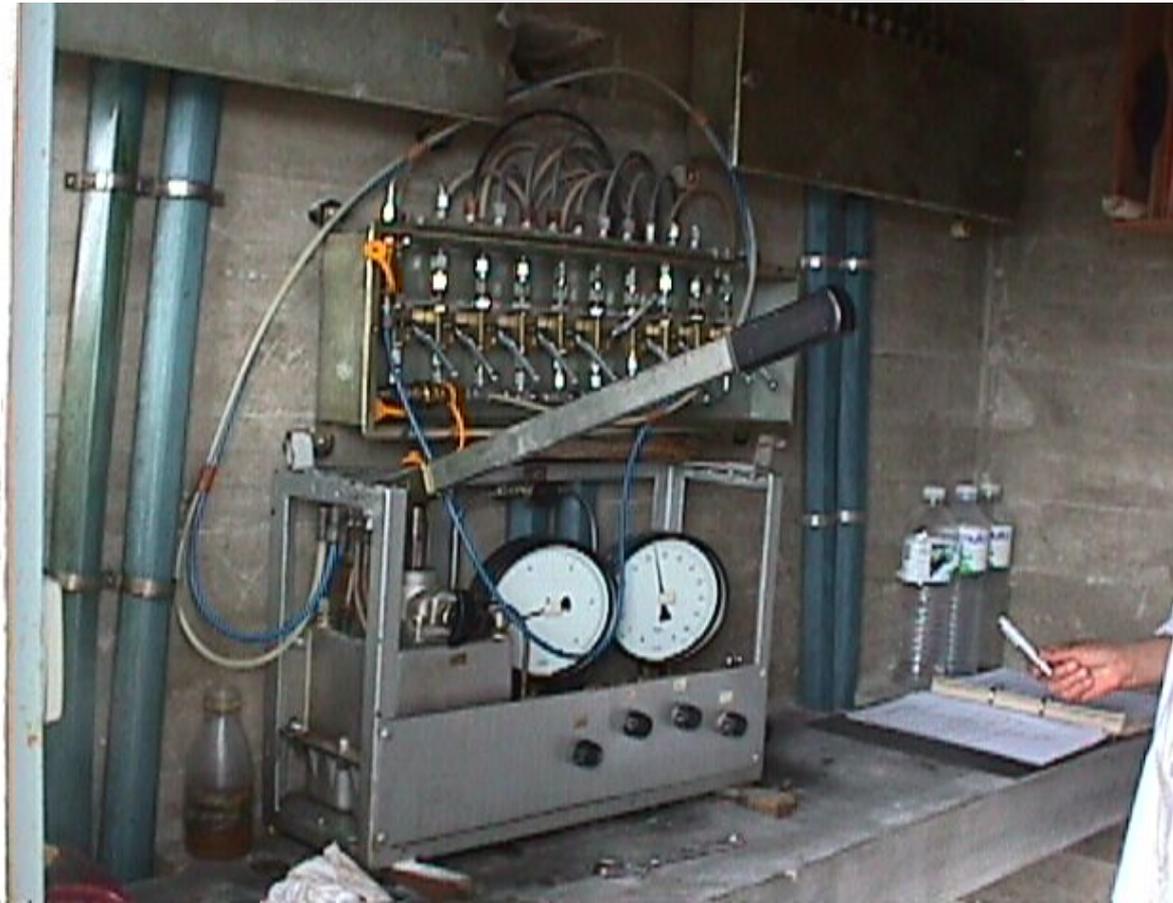


- > Passagem dos cabos
- > central de leituras

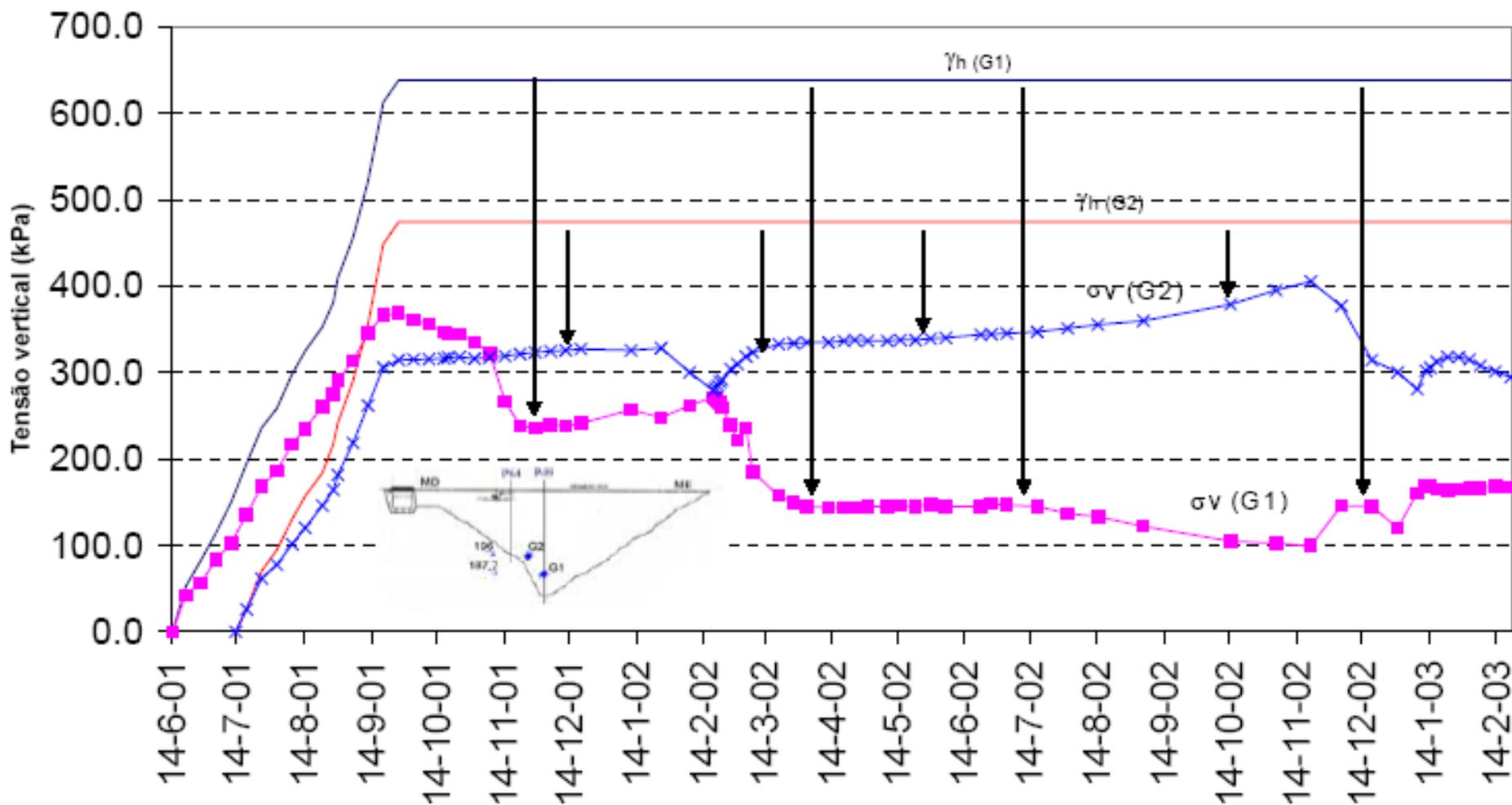


Central de leituras

- > Células tensão total hidráulicas
- > óleo



Interpretação de leituras



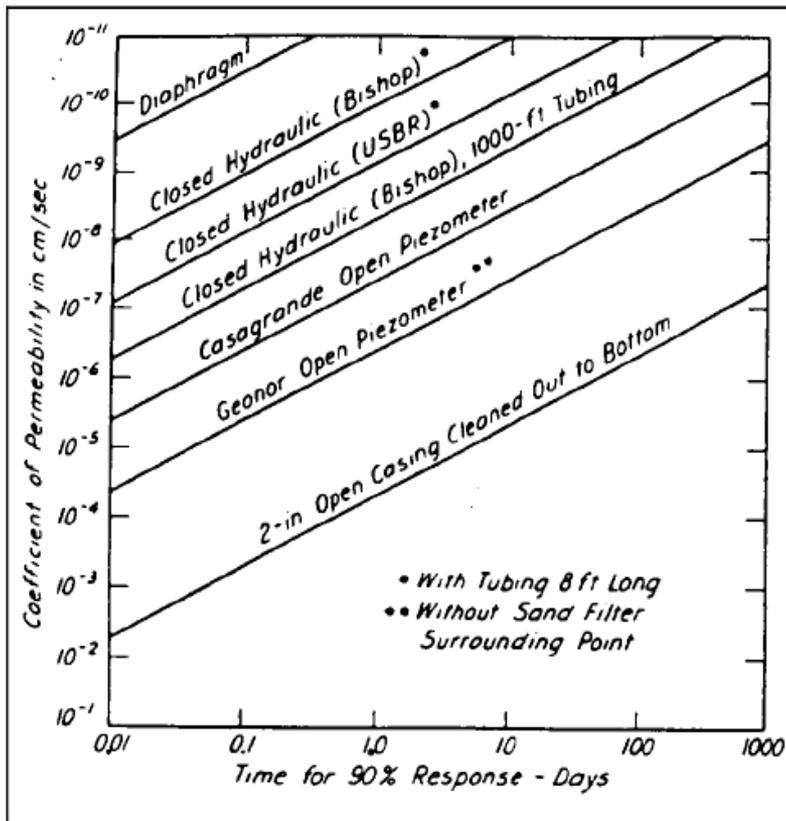
Células “especiais”



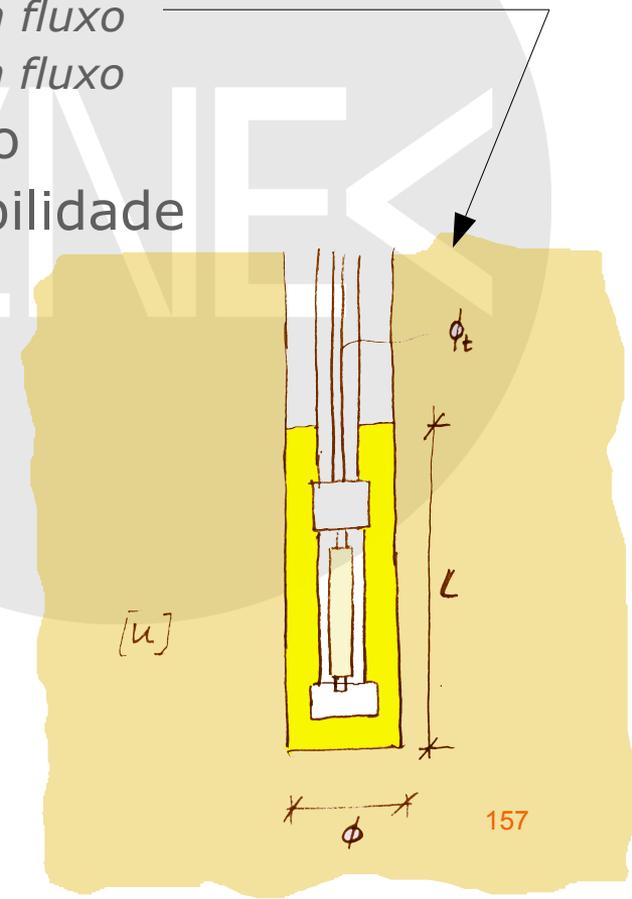
Pressões intersticiais

> aspectos a considerar

- fiabilidade
- durabilidade
- tempo de resposta
 - o com fluxo
 - o sem fluxo
- acesso
- sensibilidade
- custo

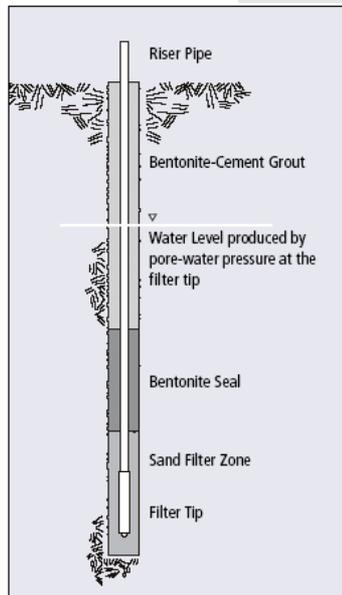
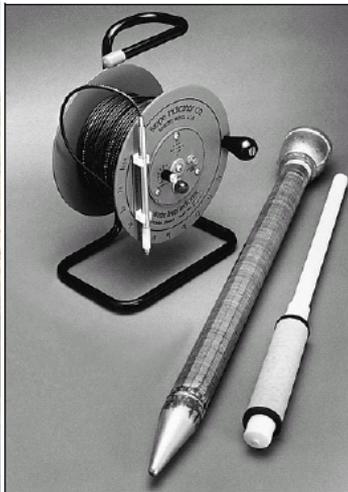


Terzaghi and Peck 1967

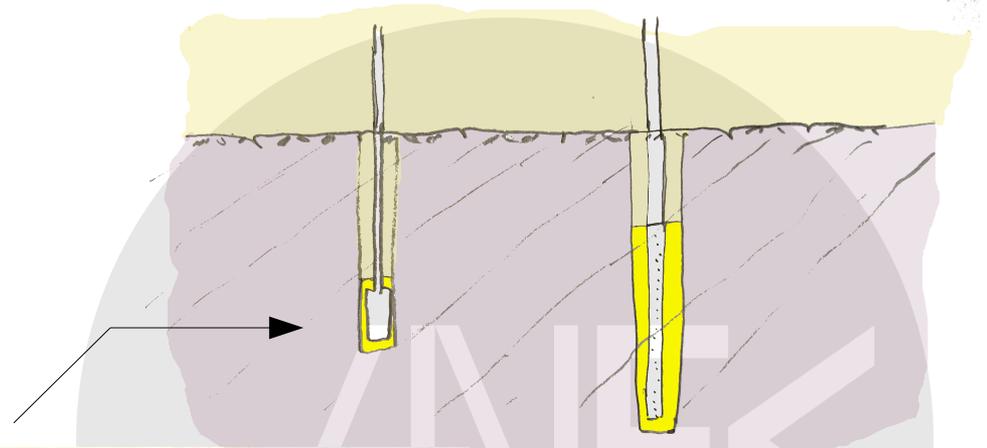


Piezómetros - Instalação

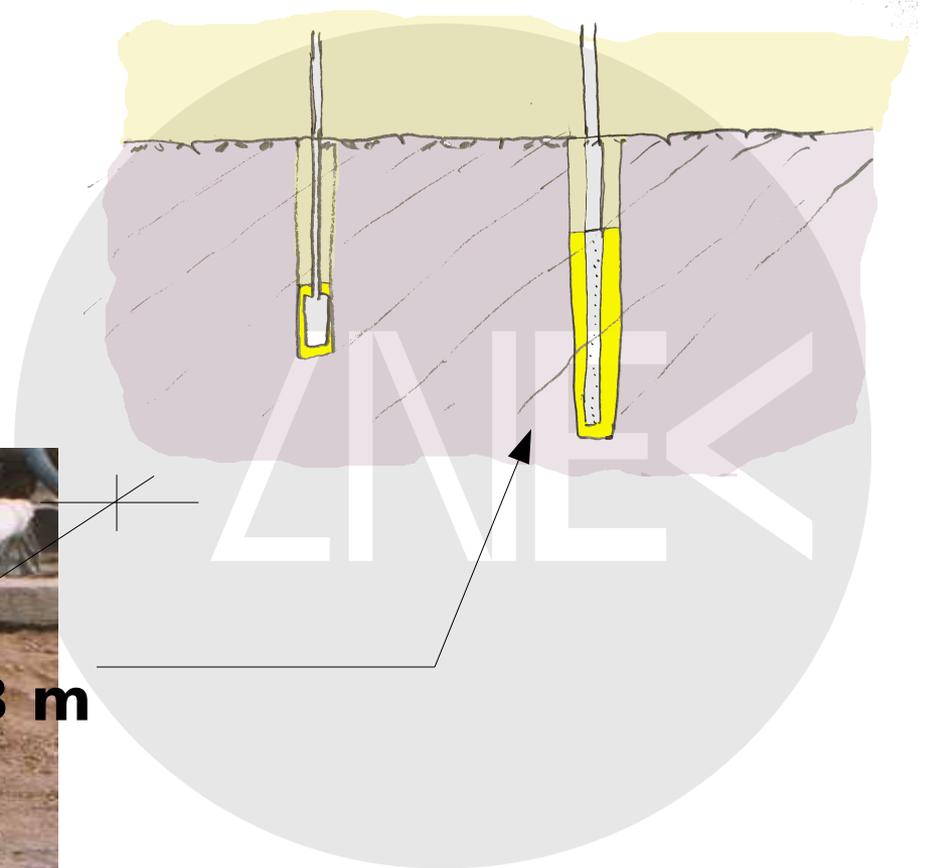
- > furação a seco
- > entubada
 - passagem de fitros
 - dreno
- > isolamento



Piezómetro “tipo LNEC”



Piezómetro de fundação



l=3 m

Tubo aberto e ponta crepinada

Piezómetros sem fluxo

> Resposta imediata

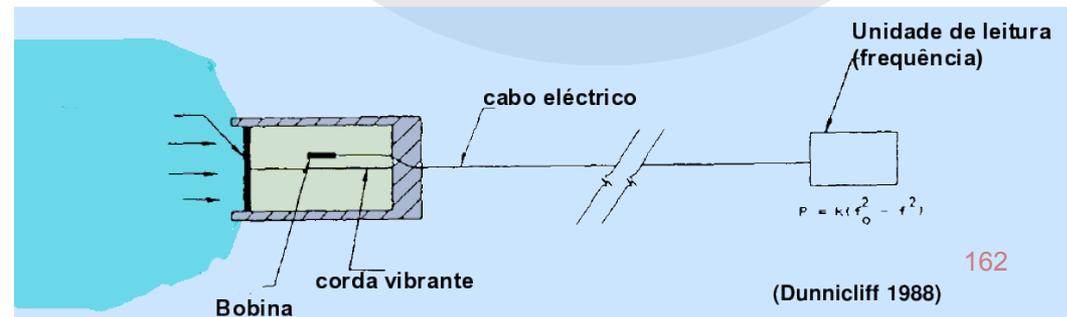
- > sensibilidade
- > precisão
- < durabilidade
- > custo

- > acompanhamento da fase construtiva
- > materiais muito impermeáveis
- > facilidade de instalação (não requerem um alinhamento vertical)

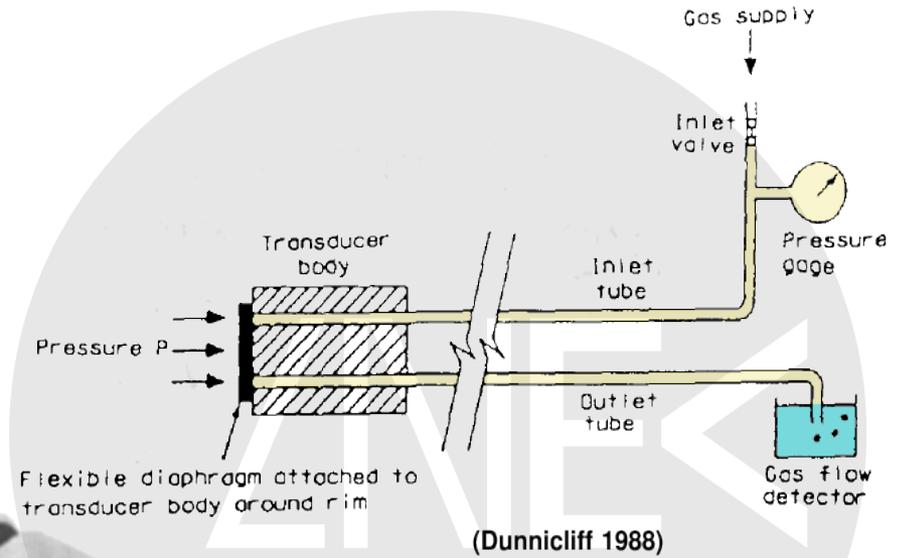
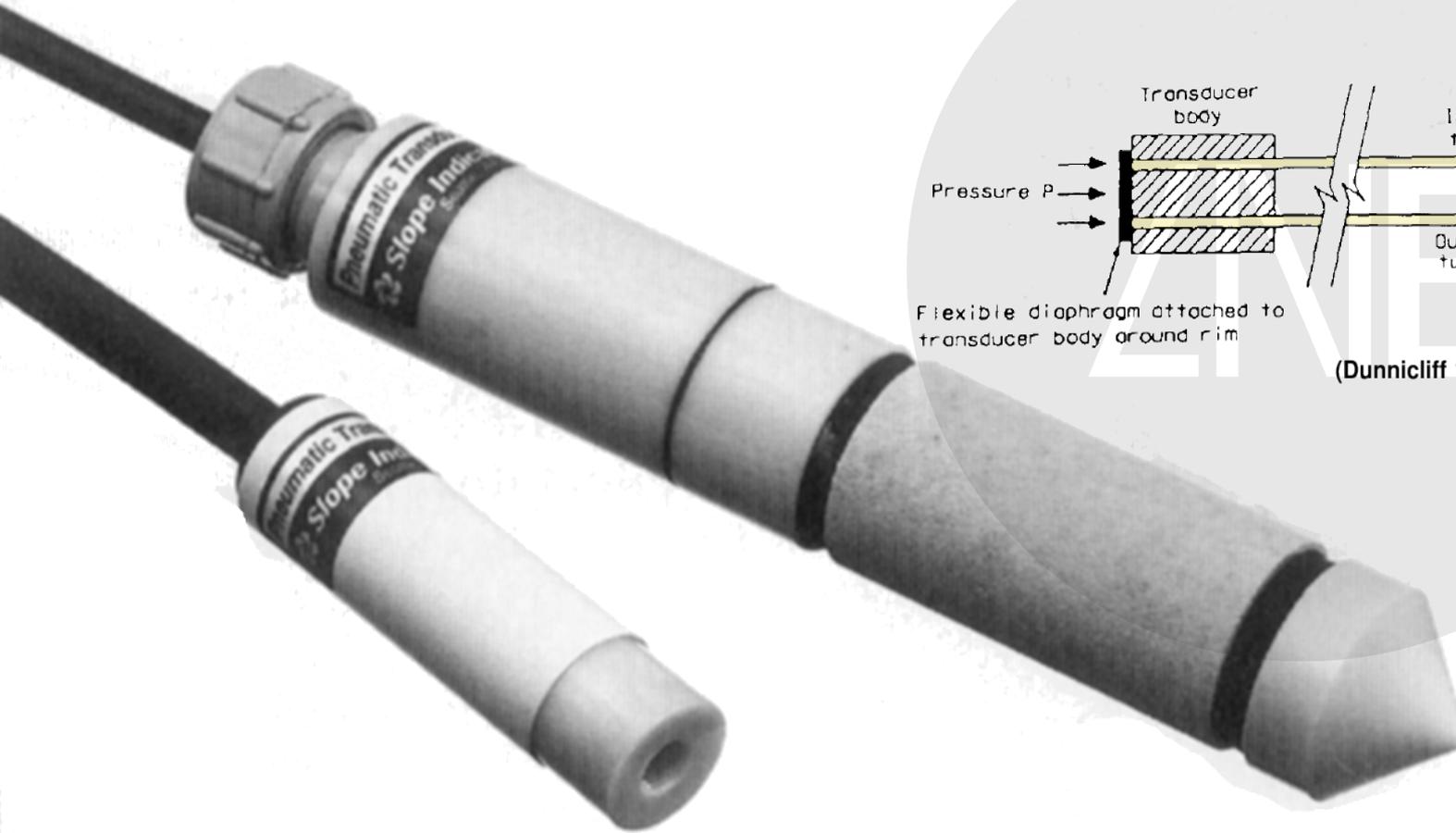
Piezômetros de corda vibrante



- > Vantagens:
 - rápido
 - preciso
 - fácil instalar
 - possibilidade de leitura automática
 - sucções
- > Desvantagens:
 - sensibilidade à temperatura
 - trovoadas
 - custo
 - pequena duração



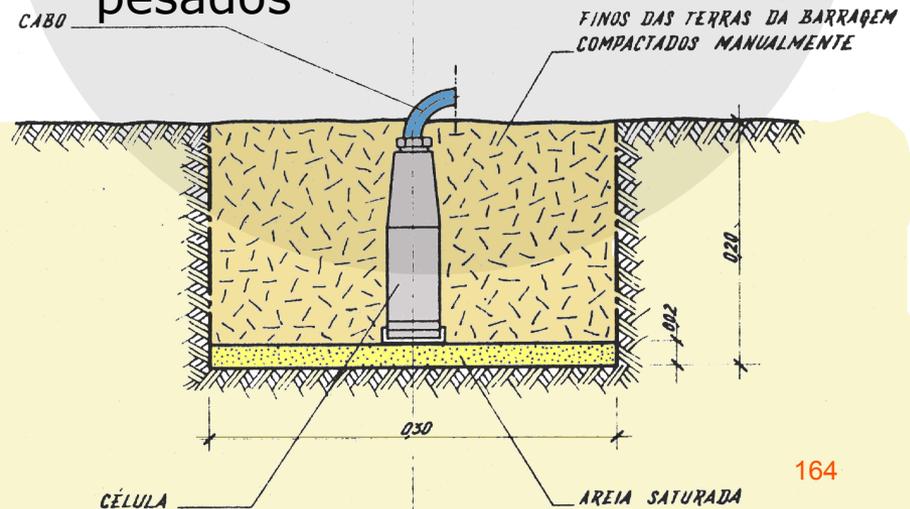
Piezómetros pneumáticos



Cuidados na montagem

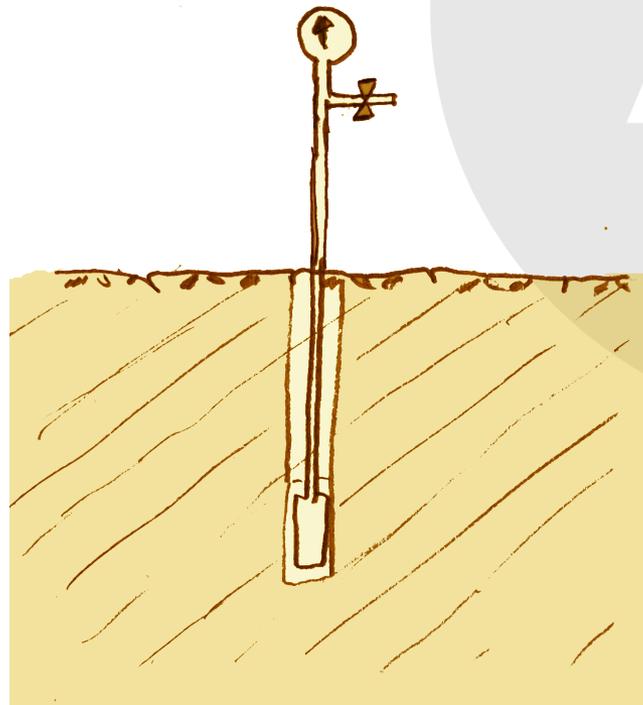


- > caminhos de cabos ou tubos
- > saturação das ponteiras
- > central de leituras
- > evitar criar caminhos de percolação com cabos
- > proteger da compactação directa com equipamentos pesados



Piezómetros fechados

- > pressão > cota ponto de medição
- > permite ler também um caudal



Medição de caudais

> Caudais totais

- “integram” o funcionamento hidráulico da obra
- NOIB



Altura da barragem — h (metros)	Caudal de infiltração
< 15	x Caudal total $SE \alpha_g > 10$ ou $R \geq 3$
15 a 30	x Caudal total
30 a 50	x Caudal parcial $SE R \geq 3$
50 a 100	x Caudal parcial
> 100	x Caudal parcial

> Aspectos a considerar

- caudal previsto
- automatização
- pontos de leitura (caudais parciais)

> Alternativas + frequentes

- “fontanário”
- descarregador em “V”

Medição de caudais

> Em fontanário

- medição do tempo para encher um volume conhecido



> Descarregador triangular

- leitura directa
- fácil de automatizar



No interior de galerias

> Recolha de caudais de fissuras



> Recolha de caudais dos drenos



Condições topográficas desfavoráveis

- > Construção de muro
- > implantação do descarregador/medidor

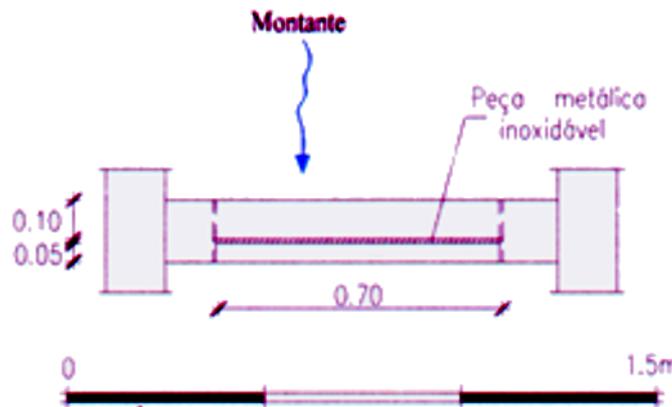
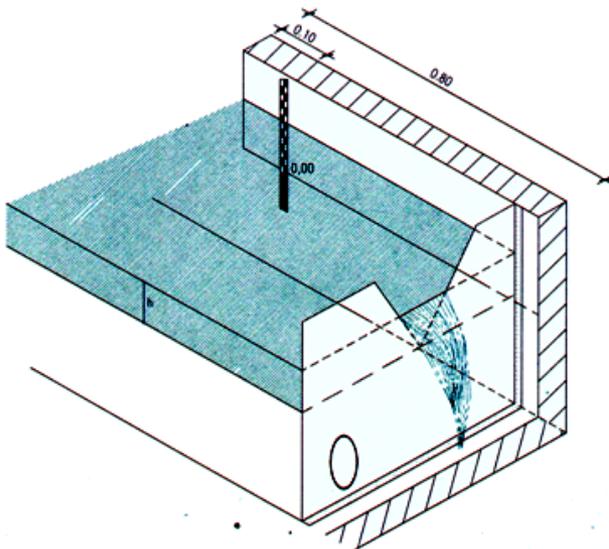
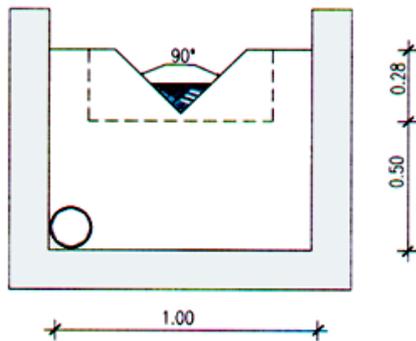


Dimensionamento

$$Q = 1420 h^{2,5} \quad (Q - l/s; h - m)$$

> boa precisão para uma gama razoável de caudais

> regras simples para determinar a forma do canal



h (cm)	Q (l/s)
1	0.01
10	4.49
20	25.4

Acções dinâmicas

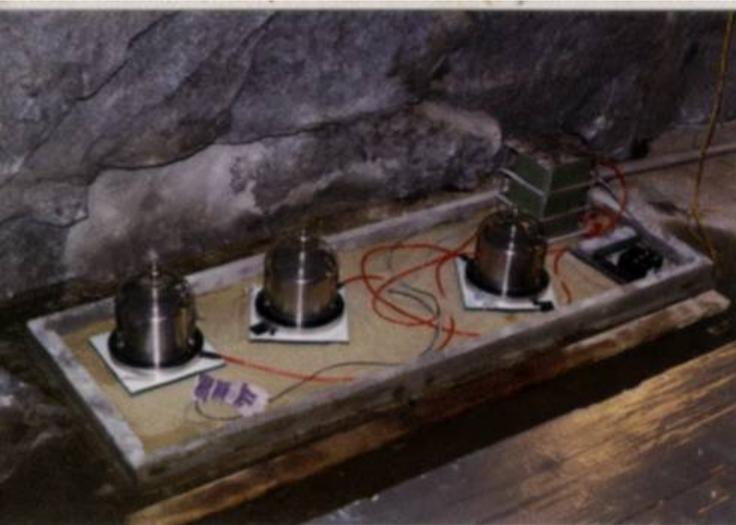
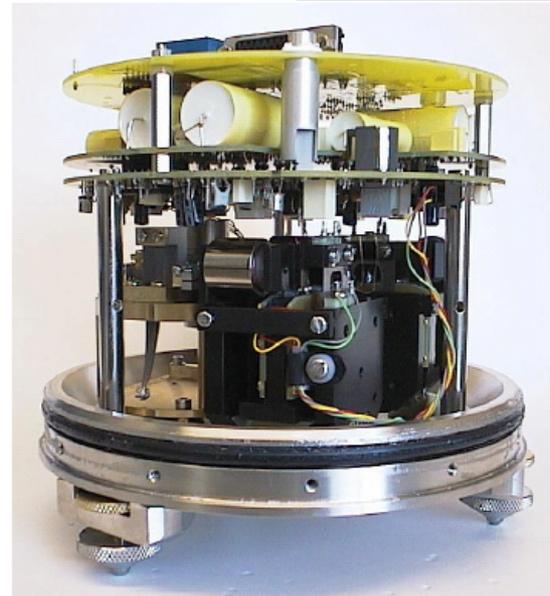
- > Sismos
 - > outras vibrações

 - > Medição de:
 - deslocamentos
 - velocidades
 - acelerações

 - > 3D
- > Sismógrafos – registo contínuo do movimento em 3 direcções
 - > Acelerógrafo strong-motion
 - > Acelerógrafo de registo de pico
 - > Sismoscópios
 - > Sismómetros – medição de vibrações

Sismógrafo

- > Activação através de "trigger"
- > Registo 3D



Inspeção visual

ZNEK

Inspecção visual

- > indispensável no contexto da observação
- > complementa a instrumentação
- > carácter contínuo
- > inspeccionar “toda” a barragem
- > preencher ficha de inspecção
 - permite assegurar que “todos” os aspectos são contemplados
 - registos fotográficos
 - desenhos

Ficha de inspecção

- > Dados sobre a barragem
 - rio/ribeira
 - bacia
 - dono de obra
 - ...
- > Dados sobre projecto e construção
 - tratamento da fundação
 - sistema de drenagem
 - ...

- > Aspectos a inspeccionar
 - > Equipamentos instalados
 - > Perfis com instrumentação
- Exemplo: Barragem de Óbidos
- >